

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

Факультет інформатики та обчислювальної техніки

Кафедра технічної кібернетики

«На правах рукопису»  
УДК 004.43

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри  
\_\_\_\_\_ І.Р. Пархомей  
(підпис)

“ \_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2019 р.

## Магістерська дисертація

на здобуття ступеня магістра

зі спеціальності 126 «Інформаційні системи та технології»

на тему: Інтелектуальна система управління автономного роботизованого підводного апарату

Виконав: студент другого курсу, групи ІК–82мп  
(шифр групи)

\_\_\_\_\_ Стенін Олександр Сергійович \_\_\_\_\_  
(прізвище, ім'я, по батькові) (підпис)

Науковий керівник к.т.н., доц. Пасько В.П. \_\_\_\_\_  
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали) (підпис)

Консультант НК \_\_\_\_\_ к.т.н., доц. Пасько В.П. \_\_\_\_\_  
(назва розділу) (науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ініціали) (підпис)

Рецензент \_\_\_\_\_  
(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали) (підпис)

Засвідчую, що у цій магістерській дисертації немає запозичень з праць інших авторів без відповідних посилань.

Студент \_\_\_\_\_  
(підпис)

Київ – 2019 року

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

Факультет інформатики та обчислювальної техніки

Кафедра технічної кібернетики

Рівень вищої освіти – другий (магістерський)

Спеціальність 126 «Інформаційні системи та технології»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ І.Р. Пархомей

(підпис)

«\_\_» \_\_\_\_\_ 2019 р.

**ЗАВДАННЯ**  
**на магістерську дисертацію студенту**  
**Стеніну Олександр Сергійовичу**  
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема дисертації «Інтелектуальна система управління автономного роботизованого підводного апарату»,

науковий керівник дисертації к.т.н., доц. Пасько В.П,  
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від «28» жовтня 2019 р. № 3770–с

2. Термін подання студентом дисертації 18.11.2019

3. Об'єкт дослідження – : процес управління АРПА з елементами штучного інтелекту

4. Предмет дослідження – моделі і методи автоматизації процесів цільового руху АРПА в умовах невизначеності підводного середовища з використанням інтелектуальної системи підтримки прийняття управлінських рішень.

5. Перелік завдань, які потрібно розробити –; розробка детермінованого алгоритму планування оптимального маршруту АРПА; розробка принципів побудови інтелектуальних систем АРПА; розробка алгоритму оптимальної стабілізації АРПА; розробка методу відновлення геометрії рельєфу.

6. Орієнтовний перелік ілюстративного матеріалу 6

7. Орієнтовний перелік публікацій 6

8. Консультанти розділів дисертації

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
НК	К.т.н., доцент Пасько В.П.		
Перевірка на співпадіння	К.т.н., доцент Лісовиченко О.І.		

9. Дата видачі завдання \_\_\_\_\_

#### Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Аналіз предметної області та постановка задачі	03.09.2019 – 07.09.2019	
2	Вибір технологій для розробки систем	8.09.2019 – 11.09.2019	
3	Проектування алгоритмів	12.09.2019 – 22.09.2019	
5	Розробка основних модулів	23.09.2019 – 29.09.2019	
6	Оптимізація роботи систем	30.09.2019 – 10.10.2019	
7	Аналіз розробленої системи	11.10.2019 – 19.10.2019	
8	Написання та оформлення пояснювальної записки до дипломної роботи	20.10.2019 – 23.10.2019	
9	Висновки	24.10.2019 – 27.10.2019	

Студент

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Стенін О.С.  
(ініціали, прізвище)

Науковий керівник дисертації

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Пасько В.П.  
(ініціали, прізвище)

## АНОТАЦІЯ

В роботі розглянуто проблему у області оптимізації автономного роботизованого підводного апарату в умовах невизначеності підводного середовища, забезпечення безпеки і підвищення ефективності процесів цільового руху.

Проаналізовано сучасний стан побудови АРПА, він показав, що зростаючі складності вирішуваних завдань зумовлюють необхідність використання сучасних підходів до проектування ІСУ АРПА з використанням ІСППР ситуаційного типу. Проведено аналіз основних завдань АРПА, що показав, що рух в цільову точку і повернення на базу є практично основним елементом у різних місіях АРПА і потребує дуже складної взаємодії агентів підсистем АРПА, в тому числі в умовах виникнення нештатних ситуацій, зумовлених як зовнішніми (непередбачені перешкоди), так і внутрішніми (несправності апаратної частини, збій програмного забезпечення, вичерпання запасу електроенергії) причинами.

Розроблено детермінований алгоритм АРПА на основі методу динамічного програмування на основі апарату марківських процесів для різних критеріїв якості і в різних умовах функціонування.

Розроблено алгоритми управління АРПА, які можуть, крім штатних режимів, працювати і при невизначеності рельєфу підводних перешкод різного типу.

Розроблено оптимальний алгоритм стабілізації програмного руху стаціонарного АРПА на основі методу невизначених коефіцієнтів, який на відміну від існуючих забезпечує задані динамічні показники процесів стабілізації.

Розроблено робастний субоптимальний алгоритм стабілізації програмного руху АРПА с параметричною невизначеністю на основі принципу динамічної гарантованості, що дозволяє враховувати похибки оцінки параметрів АРПА.

Запропоновано МРС – підхід для стабілізації програмного руху АРПА, якщо динамічна модель АРПА невідома.

Отримані результати імітаційного моделювання підтверджують ефективність розроблених алгоритмів.

Ключові слова: АРПА, ефективність управління, ІСППР, ситуаційний тип, детерміноване планування, робастний.

Розмір пояснювальної записки 80 аркушів, містить 30 ілюстрацій, 23 таблиці, 6 додатків

## ABSTRACT

The problem of optimization of autonomous robotic submarine in the conditions of uncertainty of the underwater environment, safety and increase of efficiency of the processes of target movement is considered in the work.

Analyzed the current state of construction of ARU, he showed that the increasing complexity of the tasks being solved necessitate the use of modern approaches to the design of the ARU ISU using situational type ISSPR. An analysis of the main tasks of the ARU has been carried out, which showed that the movement to the target point and return to the base is practically a basic element in different missions of the ARU and requires a very complex interaction of agents of the ARU subsystems, including in conditions of emergencies caused by external (unforeseen obstacles) ) and internal (hardware failures, software crashes, running out of power) causes.

A deterministic algorithm based on the dynamic programming method based on the Markov apparatus apparatus for different quality criteria and in different operating conditions is developed.

Algorithms for control of ARU have been developed, which can, in addition to regular modes, work with uncertainty of terrain of underwater obstacles of various types.

The optimal algorithm for stabilization of programmatic motion of stationary ARPA based on the method of uncertain coefficients, which unlike the existing ones, provides the set dynamic parameters of stabilization processes.

A robust suboptimal algorithm for the stabilization of the ARU program motion with parametric uncertainty based on the dynamic guarantee principle has been developed, which allows to take into account the errors in the estimation of the ARU parameters.

An MPC approach is proposed to stabilize the ARU programmatic motion if the dynamic model of the ARU is unknown.

The obtained simulation results confirm the efficiency of the developed algorithms.

**Keywords:** ARU, management effectiveness, ISSPR, situational type, deterministic planning, robust

The size of the explanatory note is 80 sheets, contains 30 illustrations, 23 tables, 6 applications.

**ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА**  
**до магістерської дисертації**

на тему: Інтелектуальна система управління автономного роботизованого  
підводного апарату

## ЗМІСТ

<b>ВСТУП.....</b>	<b>12</b>
<b>РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ПРОБЛЕМИ УПРАВЛІННЯ АВТОНОМНОГО РОБОТИЗОВАНОГО ПІДВОДНОГО АПАРАТУ.....</b>	<b>14</b>
1.1. Характеристика існуючих АРПА.....	14
1.2. Аналіз проблеми та шляхи підвищення ефективного управління АРПА...	20
1.3. Мультиагентна технологія побудови ІСППР на основі нечітких ситуаційних мереж.....	25
1.3.1. Структура ІСУ АРПА з мультиагентною архітектурою.....	28
1.3.2. Структура бази знань ІСППР ситуаційного типу.....	29
1.4. Склад і функціонування ІСППР ситуаційного типу.....	30
1.5. Загальний нечіткий ситуаційний алгоритм прийняття рішень при управлінні АРПА.....	33
Висновки до розділу .....	38
<b>РОЗДІЛ 2. ФОРМУВАННЯ ОПТИМАЛЬНОГО МАРШРУТУ АВТОНОМНОГО РОБОТИЗОВАНОГО ПІДВОДНОГО АПАРАТУ ТА АЛГОРИТМІВ ЙОГО РУХУ В УМОВАХ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ.....</b>	<b>39</b>
2.1. Математична модель динаміки руху АРПА.....	39
2.2. Детерміноване планування оптимального маршруту АРПА.....	39
2.3. Ситуаційне планування оптимального маршруту АРПА.....	41
2.4. Алгоритм руху АРПА в умовах невизначеності підводного рельєфу типу «тунель / ущілина».....	47
2.4.1. Метод відновлення геометрії рельєфу.....	48
2.4.2. Синтез траєкторії руху АРПА.....	50
2.5. Алгоритм руху АРПА в умовах невизначеності рельєфу типу «одиначка перешкода».....	51
Висновки до розділу .....	55

<b>РОЗДІЛ 3. СТАБІЛІЗАЦІЯ ПРОГРАМНОГО РУХУ АВТОНОМНОГО РОБОТИЗОВАНОГО ПІДВОДНОГО АПАРАТУ.....</b>	<b>56</b>
3.1. Модальна стабілізації програмного руху АРПА.....	56
3.2. Робастна стабілізації програмного руху АРПА з параметричною невизначеністю.....	58
3.3. Стабілізація програмного руху АРПА на основі MPC–підходу.....	62
3.4. Оптимальна стабілізація АРПА в режимі зависання.....	64
3.5. Моделювання перехідних процесів в контурах стабілізації стану АРПА..	66
Висновки до розділу.....	69
<b>РОЗДІЛ 4. МАРКЕТИНГОВИЙ АНАЛІЗ СТАРТАП–ПРОЕКТУ.....</b>	<b>70</b>
4.1. Опис ідеї проекту.....	70
4.2. Технологічний аудит ідеї проекту.....	72
4.3. Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту.....	73
4.4. Розроблення ринкової стратегії проекту.....	79
4.5. Розроблення маркетингової програми стартап-проекту.....	81
Висновки до розділу.....	83
ВИСНОВКИ.....	84
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....	85
ДОДАТКИ	



## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

АРПА – автономного роботизованого підводного апарату

ІСППР – інтелектуальна система підтримки прийняття управлінських рішень

СУ – система управління

МАС – мультиагентна система

НСМ – нечітка ситуаційна мережа

## Вступ

В даний час автономні роботизовані підводні апарати (АРПА) є одним з перспективних напрямків розвитку робототехніки. Сучасні підводні апарати здатні виконувати широке коло завдань, серед яких особливе місце займають завдання управління АРПА, зокрема, використовуваних для моніторингу та ліквідації підводних надзвичайних ситуацій, що сприяє збереженню людських життів. Крім того, АРПА дозволяють скоротити експлуатаційні витрати, знизити ймовірність помилки за рахунок зменшення впливу людини–оператора на процес управління, підвищити час безперервної роботи, зменшити масогабаритні параметри підводної техніки. Ефективність застосування АРПА багато в чому залежить від можливостей його СУ, створення якої становить вельми нетривіальну задачу, оскільки вона, крім забезпечення виконання поставленого завдання, повинна приймати рішення в різних важко передбачуваних нештатних ситуаціях. Крім того, при прийнятті рішення доводиться враховувати велику кількість обмежень, обумовлених автономністю апарату, місцем існування, обмеженими ресурсами. Тому завдання інтелектуалізації АРПА має безперечну актуальність. Крім того, при створенні СУ АРПА до проблем, які потрібно вирішити при створенні СУ наземних і повітряних автономних технічних засобів, додається ряд специфічних проблем, які значно ускладнюють завдання. І, в першу чергу, обмеженими можливостями АРПА по точності автономної підводного навігації. Оскільки розробка СУ для АРПА будь-якого призначення є найбільш трудомісткою частиною створення АРПА, цілком природним є бажання розробити уніфіковану СУ, яку можна було б встановлювати на апарати, які вирішують різні завдання. І це цілком можливо, оскільки місії, виконувані АРПА різного призначення, складаються в основному з ідентичних етапів. Це питання залишається актуальним і до сьогоднішнього дня. Розроблені в роботі моделі і методи, алгоритмічні та програмні засоби інтелектуального управління АРПА можуть знайти широке застосування для таких завдань, як інтелектуальна підтримка прийняття диспетчерських рішень при управлінні міським транспортом і міськими інженерними мережами та ін.

**Метою роботи** є забезпечення безпеки і підвищення ефективності процесів цільового руху АРПА з елементами штучного інтелекту в умовах невизначеності підводного середовища.

Щоб реалізувати обрану мету в роботі ставляться наступні дії :

- розробити принципи побудови ІСППР на основі нечітких ситуаційних мереж;
- розробити методи детермінованого та ситуаційного планування програмних траєкторій цільових маршрутів АРПА;
- розробити метод відновлення геометрії рельєфу підводних перешкод різного типу;
- розробити алгоритми обходу/проходу підводних перешкод в умовах невизначеності;
- розробити алгоритми оптимальної стабілізації програмного руху АРПА.

## РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ПРОБЛЕМИ УПРАВЛІННЯ АРПА

### 1.1. Характеристика існуючих АРПА

Наша цивілізація на початку третього тисячоліття зіткнулася з безліччю глобальних проблем, в числі яких обмеженість сировинних ресурсів суші висувається на одне з перших місць.

У цих умовах погляди далекоглядних політиків і вчених спрямовані до Світового океану, в надрах якого прихований величезний мінерально-сировинний потенціал. Дізнатися, досягнути й освоїти багатства Світового океану – іншої альтернативи виживання швидко зростаючому людству в доступному для огляду майбутньому немає. І це повинно відбутися вже в середині ХХІ століття.

У зв'язку з цим особливої актуальності набуває розвиток робіт в області спеціального суднобудування, включаючи населені підводні апарати і незаселені підводні апарати, останні, в свою чергу, поділяються на автономні (АРПА) і телекеровані (ТРПА). Характерним прикладом АРПА може служити Echo Voyager, Boeing (США) (рис1.1). Довжина АРПА 15.5 м, не вимагає використання корабля підтримки. Здатний автономно плавати під водою до декількох місяців за рахунок використання акумуляторів, що заряджають від бортового дизель-генератора, може збирати різні дані, вести картографування підводного середовища, працювати в якості транспортного засобу та інше.



Рисунок 1.1. АРПА Echo Voyager, Boeing (США)

Прикладом ТРПА може служити апарат класу ROV сімейства «Морське око» – Seaeye Leopard, Saab Seaeye (Швеція). Оснащений двома маніпуляторами. Розробка СААБ, Швеція. Розробка 2002 року, занурення до 300 метрів, 14 кг корисного навантаження (рис.1.2).



Рисунок 1.2. ТРПА Seaeye Leopard, Saab Seaeye (Швеція)

До видів технічних і дослідницьких робіт, що здійснюються підводними апаратами різного призначення, можна віднести [1–7]:

- Загальні види робіт (доставка і підйом матеріалів, забезпечення аварійних та рятувальних робіт, фото– і відеозйомка та ін.).
- Пошук і розвідка промислових безхребетних і риб.
- Геологічні і геофізичні дослідження (спостереження за режимом і розвитком континентального шельфу і ін.).
- Біологічні дослідження (ідентифікація і вивчення міграцій морських організмів, піймання живих особин і ін.).
- гідрофізичного дослідження (вивчення полів температури, солоності, щільності, звукових полів в придонних шарах і ін.).

Відомо [5–7], що ефективність проведення робіт за допомогою буксированих коштів або прив'язних апаратів різко зменшується зі збільшенням

глибини. АРПА, володіючи значно більшою маневреністю, ніж ТРПА, високим ступенем стабілізації параметрів руху (в тому числі в умовах складного рельєфу дна), а також простотою експлуатації, має продуктивність, що не залежить від глибини.

За останні два десятиліття в різних країнах, що займають провідне становище в галузі підводної робототехніки, була створена велика кількість АРПА, або AUV (Autonomous Underwater Vehicles) – за міжнародною класифікацією, що використовуються для вирішення широкого кола наукових і прикладних задач по дослідженню і освоєнню океану. За відносно короткий період часу АРПА продемонстрували свою ефективність при виконанні глибоководних оглядово-пошукових і дослідницьких робіт і відкрили ряд нових важливих застосувань для морської геологорозвідки, освітлення підводної обстановки, моніторингу підводних технічних споруд (трубопроводів, кабельних трас та ін.) і водного середовища в цілому [5,6].

Сучасні АРПА є особливим класом підводних робототехнічних засобів з властивими їм завданнями і практичним застосуванням, особливостями технології, складом систем і функціональними властивостями.

Проблеми, пов'язані з розвитком АРПА, багатопланові і в багатьох випадках не мають поки закінчених рішень. Системи, що входять до складу АРПА і суднового устаткування, відрізняються великою різноманітністю за призначенням і фізичним принципам роботи, що породжує досить жорсткі і суперечливі вимоги до технології та системної організації.

У свою чергу, розширення функціональних можливостей АРПА пов'язано з вирішенням ряду нових теоретичних і технологічних проблем. В першу чергу це завдання керування та навігації, орієнтування на місцевості, збору та накопичення різноманітної цільової інформації про середовище і, нарешті, забезпечення безпеки апарату в штатних режимах і в особливих ситуаціях. Цілком очевидно, що їх рішення безпосередньо пов'язане з ефективним використанням на АРПА методів і засобів гідроакустики.

У журналі «Sea Technology» була опублікована робота [7], Джона Р. Крайдера, в якій автор сформулював три основні вимоги, яким повинна задовольняти технологія побудови АРПА:

- спрямована на те, щоб «робити роботу»;
- повинна забезпечити «мінімальний споживчий ризик»;
- повинна забезпечити «економічний ефект».

Питання, яке було сформульоване в цій роботі, насправді виникло значно раніше, коли перед фахівцями вперше стала проблема, як подолати «бар'єр» глибини при неодмінних умов – апарат повинен бути відносно невеликим, надійним і досить універсальним, тобто повинен допускати можливість функціональної перебудови. Суперечливість зазначених вище вимог досить очевидна, як очевидно й те, що ці вимоги можуть бути віднесені не тільки до АРПА, а й до цілого ряду інших підводних засобів.

Наприклад, прагнення зменшити масу і розміри призводить до зростання індивідуальності розробок. Пов'язано це з тим, що серійна апаратура часто не може бути застосована в якості комплектуючих елементів через неприйнятні величини мас і габаритів. Крім того, типовий є ситуація, коли необхідна серійна продукція відсутня, а комплектуючі вироби доступні тільки у вигляді недостатньо досконалих і дорогих експериментальних зразків.

Інша особливість пов'язана з необхідністю вибору компромісних рішень між універсальністю та спеціалізацією. Причому в багатьох випадках грань, що їх розділяє, досить розмита. Універсальність АРПА може бути реалізована різними підходами в залежності від цілей, які при цьому переслідуються.

Наприклад, при створенні АРПА, який повинен служити робочим інструментом для виконання конкретних робіт в океані, повинні бути досить відпрацьовані всі його функції для кожної конкретної конфігурації систем. Будь який резерв тут небажаний, або взагалі неприпустимий, оскільки призводить до погіршення тактико-технічних характеристик апарату. Переналагодження робочого апарату на задану функцію повинна проводитися простими і надійними

способами шляхом підключення, заміни або видалення уніфікованих програмно-апаратних модулів.

Із зарубіжних розробок АРПА останніх років до найвідоміших належать розробки таких компаній, як канадська ISE, американська NOSC, французька IFREMER, а також проекти Європейського консорціуму і ряду організацій в Англії, Австралії, Японії, Норвегії та в інших країнах. Аналіз АРПА, представлених на світовому ринку, показав, що останнім часом все більшого розвитку отримують проекти комерційних апаратів класів «мікро» і «міні» масою до 100 кг. Діапазон дальності плавання АРПА категорії «міні» досить широкий і знаходиться в межах до 4000 морських миль. Найбільш відомими представниками цього класу є американські апарати наступних проектів: «Sea Glider», «Slocum Glider I / II» і «Spray Glider» (планери з системою руху на основі зміни власної плавучості).

Нове покоління АРПА «GAVIA» (рис.1.3), створених ісландської фірмою «Hafmynd Ltd.», побудовано за модульним принципом з метою вирішення більш широкого кола завдань. При цьому розроблено 2 базових типу апарату: прибережний – для глибин до 200 м і апарат відкритого моря – для глибин до 2000 м. Конструкція апарату виключає використання будь-яких динамічних ущільнень, а крутний момент до рушія і рульовим приводам передають магнітні муфти. Пріоритетом при проектуванні апарату стала мінімізація споживаної потужності для забезпечення максимальної автономності, споживана потужність (для швидкості ходу 1,5 м / с) склала менше 60 Вт.

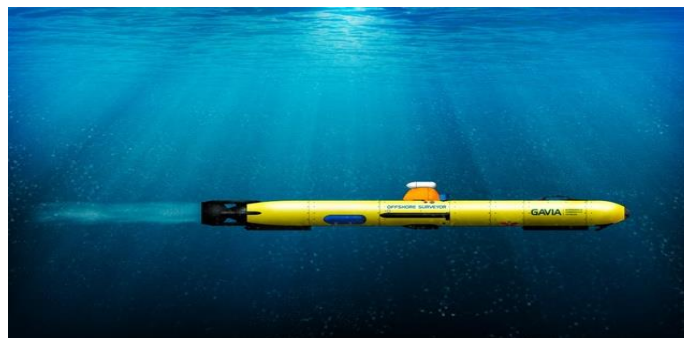


Рисунок 1.3. АРПА «GAVIA», виробник «Hafmynd Ltd.»(Ісландія)



Модульна архітектура відкрила широкі можливості для функціональної уніфікації бортових систем. Розроблена оригінальна технологія компонування, складання і монтажу бортової апаратури є істотним досягненням в галузі підводної робототехніки і забезпечує надійне функціонування апарату при виконанні ряду практичних робіт.

У 1994 р, за контрактом з приватною американською фірмою Hibbard Marine був створений автономний прив'язний апарат «TSL» (робоча глибина до 300 м), що представляє собою самохідний об'єкт з керуванням по оптоволоконному кабелю і призначений для виконання робіт на шельфі і обстеження протяжних підводних тунелів. При цьому був передбачений і автономний варіант використання даного апарату.

У Росії можна виділити АРПА Клавесін–1Р, який наділений штучним інтелектом (рис.1.4), що істотно розширює його можливості.



Рисунок 1.4. АРПА Клавесін–1Р, ЦКБ «Рубин» (Росія)

Хотілося б також відзначити, що частина відносно простих операцій: підйом раніше встановленого обладнання та ін., які виконуються підводними апаратами, можуть з успіхом замінити підводні модулі [6,7].

Підбиваючи підсумки вищевикладеного, можна зробити висновок про те, що подальший розвиток АРПА бачиться в модульності побудови, зменшенні вагогабаритних характеристик, підвищенні швидкості ходу і автономності, а також більш широке застосування інтелектуальних систем управління АРПА.

## 1.2. Аналіз проблеми та шляхи підвищення ефективного управління АРПА

Досвід створення АРПА показує, що досягнення поставлених цілей по широкому діапазону показників призначення не гарантується при зосередженні всього обсягу робіт в умовах однієї, навіть спеціалізованої, організації через значного обсягу розв'язуваних різнорідних проблем. Необхідний результат повинен бути наслідком широкої кооперації підприємств промисловості і науки, враховує всі аспекти наукового, технічного, технологічного, виробничого і випробувального взаємодії. Власне, весь сучасний західний досвід створення підводних роботів різного призначення є наочним підтвердженням цього [1–3]. Незважаючи на те, що за останні роки був досягнутий певний прогрес для формування балансу фундаментальних досліджень і технологічних розробок, в даний час придбаний досвід і традиції наукових досліджень доцільно розвивати в тісному контакті з зусиллями провідних проектно-конструкторських організацій морської техніки, які виявляють в даний час великий інтерес до проектування підводних роботів.

Подальші кроки щодо вдосконалення засобів підводного робототехніки, на наш погляд, має базуватися на рішенні нових науково-технічних проблем, що визначають обличчя сучасних багатоцільових АРПА і ефективність їх застосування при вирішенні всього різноманіття їх завдань. До яких відносяться:

- «інтелектуалізація» функціональних властивостей АРПА;
- забезпечення прецизійної підводної навігації АРПА;
- комп'ютеризація засобів бортового управління, навігації та пошуку.

При оцінці ефективності застосування АРПА принципове значення має ступінь його інформаційної автономності, тобто здатності самостійно діяти в невідомій або недостатньо відомому середовищі. В даний час місії (завдання) для АРПА формуються з використанням імперативних методів програмування (як текстових, так і графічних), що детально описують послідовність дій АРПА, які потрібно здійснити для досягнення необхідної мети. При цьому уявлення про саму мети має тільки оператор АРПА, який становить місію. Подібна технологія ефективна, якщо місія АРПА здійснюється в рамках апріорного сценарію. В

інших випадках вона може або взагалі не виконатися, або виконатися з великими порушеннями і загрозою безпеки апарату. Тому для виконання місії при непередбачених обставинах виняткове значення має «інтелектуалізація» системи управління АРПА.

Відзначимо деякі аспекти цієї проблеми. Так, в існуючих системах управління для діагностування та ідентифікації оперативних ситуацій, наприклад, аварійних, використовується контроль відповідності моделей процесів і їх реалізацій. Виникнення конфліктних ознак свідчить про «аварійність» ситуації, що вимагає реакції у вигляді певної послідовності дій системи. У багатьох випадках така поведінка системи виправдана, проте існують ситуації, коли поодинокі аварії може викликати появу кількох конфліктних ознак майже одночасно, або спричинити послідовність інших аварій. У загальному випадку реакція АРПА на такі несправності не завжди є адекватною, оскільки причина аварії не виявляється. Тому необхідна «інтелектуалізація» системи управління АРПА для підвищення його живучості при виникненні небезпечних або аварійних ситуацій.

«Інтелектуалізація» системи управління АРПА має на увазі також здатність системи управління здійснювати функції аналізу сцен і загальної обстановки, орієнтування на місцевості, збору та накопичення різноманітної інформації про середовище. Традиційні методи управління не завжди ефективні в умовах неповної чи недостовірної інформації про зовнішнє середовище, при деградації частини систем (відмовах, аваріях) або необхідності адаптивного управління. Архітектури та принципи інтелектуального управління АРПА активно розробляються, але в силу специфіки роботи сенсорів і систем зв'язку АРПА це набуває додаткової складності. Тому дуже актуальна проблема підвищення потенціалу управління цими системами в АРПА на основі розробки нових методів динамічного аналізу, розпізнавання образів, адаптації та штучного інтелекту.

Для «інтелектуалізації» процесу пошуку підводних об'єктів в даний час розроблені і використовуються в системах управління АРПА алгоритми

розпізнавання в реальному часі обмеженого класу об'єктів з простими геометричними формами або типовими сигналами. Необхідно розширити цей клас. Крім того, пошук та ідентифікація об'єкта супроводжуються, як правило, впливом перешкод, варіацій зовнішніх полів і наявністю помилкових цілей.

Дослідження, що проводяться в даний час в світі, охоплюють ряд пріоритетних завдань, пов'язаних з розвитком методів навігації, управління і орієнтування в просторі, діагностуванням та ідентифікацією функціональних властивостей АРПА, формуванням спеціалізованої бази даних, побудовою системи інтелектуального управління, що підтримує комплексне рішення даного класу задач. Реалізувати інтелектуальні функції в системі управління АРПА, на думку зарубіжних фахівців, можна, якщо будувати її за ієрархічним принципом.

Перспективною в цьому плані виглядає гібридна архітектура інформаційно-керуючої системи (ІКС), в основі якої лежить трирівнева модель доцільної поведінки. Особливістю архітектури є використання поведінкових (реактивних) керуючих структур (багаторівневих структур з поглинанням) на виконавчому і тактичному рівнях. При цьому функції трьох рівнів системи розподіляються наступним чином. Нижній (виконавчий) рівень здійснює сервоконтролем за основними параметрами руху і забезпечує рефлекторні функції апарату. Для цього він містить повний набір інформаційно-вимірювальних і управляючих компонентів. Рівень проектується таким чином, щоб замикає в собі реалізацію всіх функцій, що залежать від апаратного забезпечення конкретного робота, надаючи для взаємодії з тактичним рівнем апаратно-незалежний інтерфейс сукупності керуючих функцій. Середній (тактичний) рівень служить для організації виконання чергового завдання, поставленого стратегічним рівнем, і безпосередньо управляє режимами і цілями виконавчого рівня. Для цього рівень містить набір агентів (поводжень тактичного рівня) і арбітр, який формує і підтримує керуючу структуру агентів для вирішення поточної задачі.

Верхній (стратегічний) рівень представлений програмою-завданням (місією), що містить призначенням роботи, або людиною-оператором. При

цьому місія АРПА і його бажана поведінка описується в термінах агентів, що складають бібліотеку тактичного рівня архітектури [4,5]. Бібліотека формується на основі функціональної декомпозиції цільового класу задач.

В даний час активно ведуться дослідження в області створення інтелектуальних систем підтримки прийняття рішень (ІСППР) при управлінні АРПА в умовах невизначеності. При цьому СУ АРПА, незалежно від його функціонального призначення, повинна забезпечувати рух за маршрутом, вибір оптимальних режимів руху в залежності від поставленого завдання і зовнішніх умов, прийняття рішення на виконання завдання, розпізнавання образів, донесення про виконувану роботу, повернення в задану точку.

Домінуюче становище в загальній структурі СУ АРПА займає система управління функціонуванням АРПА. Разом з тим без наявності високорозвиненої вимірювально-інформаційної системи її функціонування неможливо. Концепцією створення інтелектуальних АРПА передбачається його оснащення комплексом сенсорних і тактильних датчиків (рис. 1.5).

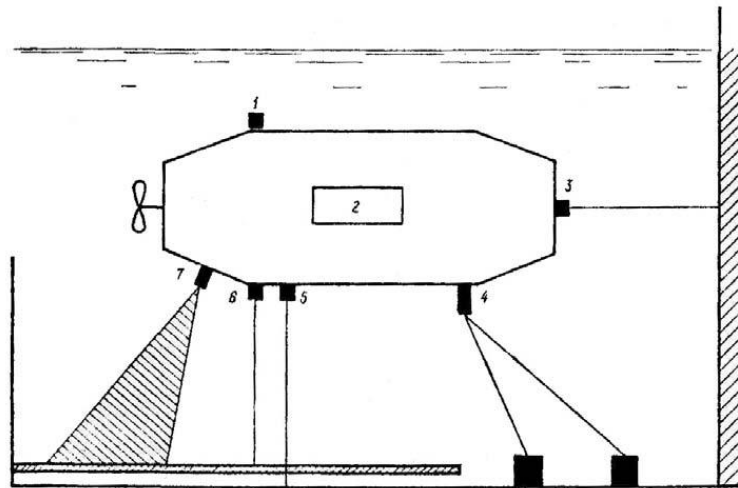


Рисунок 1.5. Система сенсорних і тактильних датчиків інтелектуальних АРПА

1 – датчик глибини; 2 – гідролокатор, 3 – магнітний компас, 4 – ВК з відеомагнітофоном,  
5 – вимірювач відстані від дна, 6 – магнітометр, 7 – маяк-відповідач.

Як вже було зазначено раніше, ефективність застосування АРПА багато в чому залежить від можливостей його інтелектуальної системи управління (ІСУ), створення якої складає вельми нетривіальну задачу, оскільки вона, крім

забезпечення виконання поставленого завдання, повинна приймати рішення в різних важко передбачуваних нештатних ситуаціях. Крім того, при прийнятті рішення доводиться враховувати велику кількість обмежень, обумовлених автономністю апарату, місцем існування, обмеженими ресурсами.

Зростаючі складності вирішуваних завдань зумовлюють необхідність використання сучасних підходів до проектування ІСУ АРПА, найбільш яскравих і перспективних з яких є мультиагентний підхід. Реалізація мультиагентного підходу в ІСУ АРПА полягає в поданні у вигляді агентів підсистем ІСУ АРПА, основними характерними рисами яких є:

- кожна підсистема ІСУ АРПА повинна містити агента, що здійснює управління даною підсистемою;
- для виконання функцій з управління агент кожної підсистеми повинен мати можливість обмінюватися інформацією з агентами інших підсистем, а також з технічними засобами своєї підсистеми;
- для скорочення складності створення агента конкретної підсистеми він може бути декомпозований в кілька агентів з більш простими функціями.

Оскільки розробка ІСУ для АРПА будь-якого призначення є найбільш трудомісткою частиною створення АРПА, цілком природним є бажання розробити уніфіковану ІСУ, яку можна було б встановлювати на апарати, які вирішують різні завдання. І це цілком можливо, оскільки місії, виконувані АРПА різного призначення, складаються в основному з ідентичних етапів (рис.1.6). Унікальні завдання, що відповідають конкретному призначенню АРПА, доцільно реалізовувати в такий уніфікованої СУ в формі опцій. Слід відзначити, що в даній роботі розглядається опція «Рух к цільовій точці» в умовах визначеності або невизначеності підводного середовища.

Оскільки в процесі руху АРПА виникають проблемні ситуації, які потребують прийняття оптимального рішення, ІСУ АРПА потребує наявності ефективної інтелектуальної системи прийняття рішень (ІСППР).

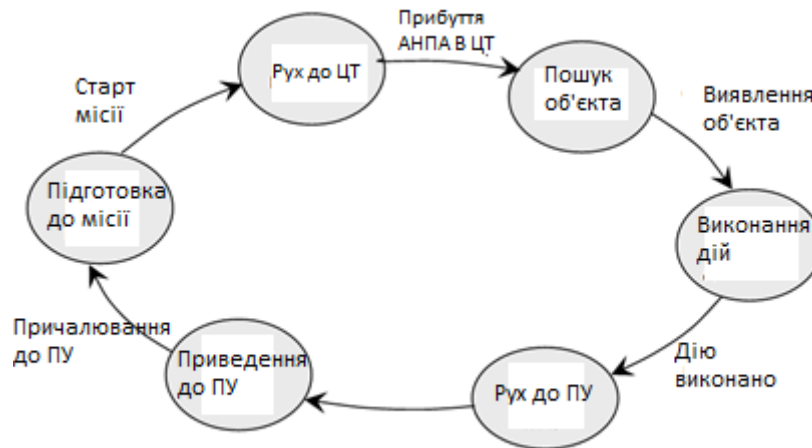


Рисунок 1.6. Етапи виконання місії (ЦТ–цільова точка;ПУ– причальний пристрій)

### 1.3.Мультиагентна технологія побудови ІСППР на основі нечітких ситуаційних мереж

Архітектура систем управління АРПА пройшла еволюцію від мультиоб'єктної до мультиагентної архітектури [8–10,22]. Перша з них характеризується наявністю централізованої системи управління (ЦСУ) і безлічі об'єктів, що виконують команди ЦСУ. Причому об'єкти обмінюються інформацією, як правило, тільки з ЦСУ.

Мультиагентна архітектура відрізняється відсутністю ЦСУ і появою замість об'єктів, що виконують команди ЦСУ інтелектуальних агентів, що взаємодіють один з одним при вирішенні поставленого завдання. При створенні ІСУ АРПА, проблема створення ЦСУ ще більш зростає, оскільки всі вимоги до ефективності роботи ЦСУ, в тому числі в важко передбачуваних нештатних ситуаціях, повинні бути реалізовані в автоматичному режимі, тобто без участі людини-оператора, здатного своїм інтелектом компенсувати недоробки СУ.

Ці міркування приводять до природного висновку про доцільність побудови ІСУ АРПА на базі мультиагентної архітектури з використанням мультиагентних технологій [9]. Системи управління, що мають мультиагентну архітектуру, називаються мультиагентними системами (МАС) [8,9]. Агент в МАС – це автономний програмний об'єкт, здатний управляти досягненням поставлених цілей в умовах невизначеності шляхом вироблення і аналізу варіантів прийняття рішень та узгодженої взаємодії з іншими агентами.

В даний час активно ведуться дослідження в області створення систем інтелектуальної підтримки прийняття рішень (ІСППР) в умовах невизначеності, що передбачає їх орієнтацію на рішення складних проблем, що характеризуються неможливістю використання методів і моделей, заснованих на точному описі проблемних ситуацій.

В результаті для вироблення керуючих рішень широкого поширення набули системи, що використовують формалізований досвід і знання фахівців у відповідних предметних областях, і побудованих на основі фреймових моделей, семантичних мереж, когнітивних карт та ін. [11–13].

При цьому моделі логічного висновку та подання знань все більше адаптуються до опису складних систем, враховуючи як ієрархічність, так і можливість зручного об'єктно-орієнтованого опису систем. З цією метою модифікується формальний базис логічного висновку і реляційної алгебри. [13].

Планування і оперативне управління АРПА є одними з найбільш складних класів задач підтримки прийняття рішень. Ряд особливостей зазначеного класу задач не дозволяють застосовувати підходи до створення ІСППР, засновані на побудові моделей об'єктів управління і їх аналізі. Такими особливостями є:

- високі вимоги до якості і оперативності управління при наявності дефіциту часу на вироблення та прийняття управлінських рішень;
- велике число чинників;
- неповнота, неточність, а, найчастіше, недостатня достовірність інформації;
- якісний характер опису ситуацій і керуючих рішень;

Неповнота, неточність, недостатня достовірність інформації, на основі якої приймаються рішення, а також практична неможливість її уточнення в силу дефіциту часу зумовлюють перспективність реалізації ситуаційного підходу при вирішенні задачі програмного руху АРПА в кінцеву точку в умовах невизначеності на основі методів нечіткої логіки. Сукупність методів ситуаційного підходу та нечіткої логіки отримала назву нечіткого ситуаційного підходу (НСП). Принципи ситуаційного управління широко впроваджуються в



класичні моделі. Прикладами можуть служити – семантичні і дискретні ситуаційні мережі, деякі варіанти вирішення на основі аналогій [12–14].

Існують різні методи, які реалізують нечіткий ситуаційний підхід. Більшість з них базується на уявленні ситуацій у вигляді сукупності нечітких значень фіксованого набору ознак. До даної групи належать методи: нечіткого логічного висновку, нечіткої класифікації, багатокритеріальної оцінки і вибору альтернатив, аналізу сукупності ситуацій у вигляді графових структур [15]. Сукупність зазначених методів дозволяє побудувати системи підтримки прийняття рішень на основі нечіткого ситуаційного підходу для різних складних об'єктів [16].

Однак для складних організаційно-технічних систем потрібно не просто ідентифікувати поточну ситуацію і відповідне їй безліч керуючих рішень, а й визначити раціональні шляхи досягнення цілей функціонування системи, для чого потрібно прорахувати можливі наслідки послідовності керуючих рішень на кілька кроків вперед. Дані завдання вимагають залучення додаткових методів. В роботі [11] узагальнені і розширено уявлення про ситуаційних системах і вводиться поняття нечіткої ситуаційної мережі (НСМ). Ситуаційні ІСППР ґрунтуються на уявленні сукупності типових станів системи у вигляді вузлів графа, переходи якого відповідають керуючим рішенням. При цьому база знань не містить в явному вигляді продукцій, що ставлять у відповідність ситуаціям управлінські рішення. Послідовність керуючих рішень, які переводять систему з поточного стану в стан, що описується цільовою ситуацією (ситуацією, найкращою в сенсі обраної системи оцінок), визначається шляхом аналізу мережі і використання одного з методів оптимізації, зокрема, метода динамічного програмування [17]. Однак застосування НСМ в ІСППР при управлінні АРПА (особливо в задачах оперативного управління) обмежена рядом факторів [10]:

- безліч можливих керуючих рішень;
- велика розмірність простору ознак;
- стохастичність;
- невизначеність;

- фактор часу прийняття рішень і ін.

Можливе часткове зняття зазначених обмежень дозволить підвищити ефективність ІСППР на основі нечітких ситуаційних мереж при вирішенні задач планування і оперативного управління складними організаційно-технічними системами, такими як АРПА.

### 1.3.1. Структура ІСУ АРПА з мультиагентною архітектурою

На рис.1.7 приведена структура ІСУ АРПА з мультиагентною архітектурою. З розгляду цієї структури слідує, що в кожному підсистемі вбудований керуючий агент, і агенти всіх підсистем можуть спілкуватися один з одним за допомогою телекомунікаційної мережі. Із загальної схеми випала підсистема планування, яка, на відміну від інших підсистем не має своїх технічних засобів. Вона перетворилася в агента планування, функціями якого є отримання по каналах зовнішньої зв'язку завдання на місію, доведення завдання до агентів всіх підсистем, оперативний контроль виконання завдань. Як було сказано вище, агент будь-якої підсистеми може бути декомпозований в кілька агентів з більш простими функціями.



Рисунок 1.7. Структура ІСУ АРПА

### 1.3.2. Структура бази знань ІСППР ситуаційного типу

Застосування НСС як основи для побудови ІСППР має на увазі наявність бази знань, структура якої відповідає уявленню знань в моделі. Відповідно до структури бази знань, розглянутої в [24], виділяють такі типи знань, кожен з яких має на увазі свої способи організації та управління.

1. Алгоритмічне (або процедурне знання) – алгоритми (програми, процедури), що обчислюють функції, які виконують перетворення, які вирішують точно певні конкретні завдання. У нашому випадку це елементи алгоритмічного ядра СППР – алгоритми побудови НСМ, виведення з неї, набір основних нечітких операцій.

2. Концептуальне (понятійне) знання – є модель предметної області у вигляді сукупності понять і зв'язків між ними. Як правило, саме в даній складовій формалізуються експертні знання. В [18] вказується, що понятійне знання не зводиться тільки до моделі предметної області. Там же виділяються підвиди даного знання – поняття (математичні і нематематичні) і правила (залежно, закони, зв'язку). У випадку АРПА до концептуального знання відносяться:

- опис якісного складу ІСУ АРПА (що містить як поняття, так і їх зв'язок у вигляді відносин між поняттями, а також атрибути – перехресні посилання);
- модель управління АРПА, що складається в сукупності еталонних ситуацій і керуючих дій.

3. Предметне знання – елементарні одиниці знання, прості твердження про характеристики АРПА (факти). Факти утворюють робочу пам'ять процесу виведення. Предметне знання в нашому випадку представлено станами АРПА, загальними і приватними списками дій, що породжуються варіантами руху в умовах невизначеності підводного середовища і, в кінцевому рахунку, утворюють ситуаційну мережу.

Загальне управління всіма елементами здійснюється системою управління бази знань. Для зв'язків між елементами вказані ролі, які грають елементи по відношенню один до одного. Робоча пам'ять процесів побудови та використання НСМ може бути реалізована як засобами тієї ж реляційної СУБД, що і концептуальна частина бази знань. Однак з точки зору швидкодії більш ефективною бачиться її програмна реалізація у вигляді структур і об'єктів оперативної пам'яті.

Застосування запропонованої моделі нечіткої ієрархічної ситуаційної мережі дозволяє подолати обмеження існуючого апарату нечітких ситуаційних мереж при вирішенні задач планування і оперативного управління складними організаційно–технічними системами. Це досягається за рахунок залучення методів об'єктно-орієнтованого підходу при описі місії АРПА, застосування апарату лінгвістичних лотерей, поділу вузлів мережі і еталонних ситуацій, побудови багатoverшинній ієрархії груп еталонних ситуацій. На основі такого підходу ІСППР, яка призначена для планування і оперативного управління АРПА в умовах невизначеності підводного середовища, дозволяє вирішувати наступні завдання:

- складати формалізований опис місії АРПА відповідно до моделі знань на основі НСМ;
- формувати модель оцінки керуючих рішень;
- здійснювати динамічну побудову НСМ на задану глибину моделювання;
- формувати сценарій управління на основі виведення по НСМ;

#### **1.4. Склад і функціонування ІСППР ситуаційного типу**

Як вже визначалось раніше, ІСППР на основі розподіленого штучного інтелекту будуються на базі мультиагентних систем (МАС), заснованих на правилах і міркуваннях на основі прецедентів. У них кожен агент розглядається як система (нерозподілений), заснована на знаннях з додаванням компонентів, що забезпечують безпеку, мобільність, якість обслуговування, взаємодія з іншими агентами, мережевими ресурсами та користувачами.

Таким чином, МАС можна розглядати як сукупність взаємопов'язаних програмних модулів (агентів), які є фрагментами знань, доступних іншим агентам. Це, іншими словами, якісь "програмні роботи", що задовольняють різним інформаційним і обчислювальним потребам кінцевих користувачів. Вони координують свої знання, цілі, вміння і плани при вирішенні проблем, тобто якісь програмно–виконавчі пристрої. В даній роботі пропонується будувати

предметно-орієнтовану ІСППР на основі технології МАС і методології ситуаційного управління.

Методологія ситуаційного управління використовується в двох контурах – контурі організації управління (адаптація структури системи) і контурі функціонування. При створенні ІСППР повинні бути реалізовані принципи цільової спрямованості системи, оцінки (розпізнавання) ситуацій, обґрунтування рішень, відкритості системи, інтегрального представлення видів інформації, адаптивності. ІСППР повинна включати інструментальний і прикладний програмні комплекси.

З урахуванням специфіки функціонування АРПА в підводному середовищі в ІСППР повинні бути сформульовані вимоги до моделі подання знань по системі понять, адекватності змісту і відповідності сформульованих знань досліджуваним процесам і придатності для виконання необхідних дій.

Цілісний опис ситуації експертом забезпечується при наявності повного набору характеризують цю ситуацію показників. Найбільш зручною та надійною формою для надання вихідних експертних знань є прецедентні пари "інформаційний опис ситуацій" – "висновок по ситуації", які виходять в ході попереднього аналізу експертом можливих ситуацій, або в ході практичного аналізу з оцінки конкретної ситуації.

Для обліку безлічі факторів вихідний набір показників розбивається на фрагменти, які об'єднують в своєму складі показники, що утворюють відносно самостійну смислову групу. Завдання оцінки ситуації розбивається на ряд приватних завдань. Рішення, формуються приватними завданнями, складають показники більш високого ступеня узагальнення, які служать вихідними даними для приватних завдань наступного рівня ієрархії і т. д. Такий процес декомпозиції загальної задачі оцінки призводить до утворення багаторівневої ієрархії пов'язаних з входу – виходу приватних завдань, а її рішення дозволяє сформувати систему рішень по окремих аспектах і загальне рішення про ступінь відповідності сформованої ситуації цілям управління.

Кожна задача (завдання) в ухваленій трактуванні представляє з себе сукупність функціональної залежності, що описують вихідну ситуацію і рішення по ситуації. З використанням підсистеми логічного виведення узагальненої оцінки ситуації і формування пояснень будуються правила і поповнюється база знань. Рішення прикладного завдання здійснюється шляхом застосування правил з бази знань до даних про поточну ситуацію.

Рішення про ситуацію формуються шляхом логіко-аналітичної обробки даних про ситуацію в цілому і приватних випадках ситуацій в даній предметній області. Причому вважається, що за ситуацій, характерних для даної предметної області («штатні ситуації»), ці дані попередньо формуються інформаційними джерелами на основі видобутої ними первинної інформації про стан і діяльність об'єктів спостереження (показники і масив підтверджують їх відомостей).

Для виявлення закономірностей процесу формування висновків про ситуацію використовуються методи індуктивного узагальнення якісної інформації. Індуктивний висновок є логічним процесом для синтезу раціональних семантичних рішень. Формальне представлення процедури прийняття рішення при оцінці ситуації має вигляд: діючі ознаки, безліч наборів їх значень-безліч ситуацій-відображення цієї множини в безліч рішень.

ІСППР забезпечує в діалозі з експертом автоматизовану налаштування на досліджувану предметну область шляхом введення в систему основних понять, атрибутів, їх можливих значень, зв'язків між ними, а також типів можливих ситуацій, характерних процесів та інтерактивна взаємодія з користувачем в процесі її функціонування. Модель процесу задається у вигляді сукупності ситуацій.

Ситуація видається сукупністю подій. Подія означає встановлення певного значення або досягнення певної межі значення одного або декількох атрибутів об'єкта (об'єктів). Таким чином, подія характеризується зміною стану одного або декількох об'єктів. Можлива послідовність протікання процесів задається їх послідовністю і ставленням передумови між ситуаціями. Ставлення передумови означає, що обов'язковою умовою виникнення ситуації є не тільки настання

характеризують її подій, але настання однієї або декількох задаються щодо передумови ситуацій. Формування інформаційних повідомлень імітує процес збору від зовнішніх джерел (операторів системи або автоматичних датчиків) повідомлень про зміни досліджуваної проблемної області.

При моделюванні процесу прогнозування механізм логічного виводу запускається автоматично через встановлені проміжки часу. Зіставляючи задані моделі процесів з вступниками інформаційними повідомленнями, здійснює видачу рекомендацій в реальному часі користувачеві і реально відбуваються процесах. Отримана інформація дає об'єктивну оцінку процесів, що відбуваються і дозволяє здійснювати прогнозування їх протікання і здійснювати контроль виконання задаються керуючих впливів.

### **1.5. Загальний нечіткий ситуаційний алгоритм прийняття рішень при управлінні АРПА**

Під нечіткої ситуаційної мережею в широкому сенсі будемо розуміти деяку структуру, яка описує можливу сукупність станів системи управління, представлену вузлами мережі, і шляхів переходу між ними, відповідних керуючим рішенням. Під станом системи будемо розуміти набір нечітких значень характеристик керованої системи, достатній для аналізу. Нечітке стан при цьому описує відразу деякий безліч можливих чітких станів керованої системи. Надалі чіткі стану називатимемо приватними станами, а нечіткі стану – узагальненими станами.

Зауважимо, що побудова нечіткої ситуаційної мережі в загальному випадку має на увазі наявність еталонних ситуацій – однієї або декількох груп узагальнених станів, об'єднаних загальним набором системних характеристик і способом подання (у вигляді посилки продукційного правила або нечіткої множини другого порядку), до яких приписують конкретні набори керуючих рішень. Еталонні ситуації узагальнюють близькі стану системи, властиві різним типових ситуацій прийняття рішення. Лінгвістичні змінні, використовувані при описі еталонних ситуацій, утворюють безліч ситуаційних ознак.

Для забезпечення високої ефективності прийнятих інтелектуальним АРПА рішень в процесі його руху при невідомому рельєф місцевості потрібна розробка інтелектуальної системи підтримки прийняття рішень (ІСППР) [19–21]. Основою побудови такої системи може бути нечітка ситуаційна мережу (Рис.1.8), побудована на типових позаштатних ситуаціях і варіанти виходу з неї при різних критеріях якості [19,21]. Побудова нечіткої ситуаційної мережі здійснюється наступним чином.

Нехай поточна ситуація, що склалася в процесі руху АРПА, описується у вигляді нечіткої ситуації такого вигляду:

$$S_{TEK} = \{M_{S_i}(x_i) / x_i\}, x_i \in X \quad (1.1)$$

де  $M_{S_i}(x_i)$  – функція приналежності лінгвістичної змінної  $x_i$ , що характеризує поточну ситуацію  $S_{TEK}$ .

Оскільки кожній лінгвістичній змінній відповідає  $j$ -й терм з безлічі термів бази знань, то формулу (2.16) можна записати у вигляді:

$$S_i = \{M_{M_{S_i}(x_i)}(T_j^i) / T_j^i\}, j = \overline{1, M}; i = \overline{1, N}; x_i \in X, \quad (1.2)$$

де  $T_j^i$  –  $j$ -й терм  $i$ -й лінгвістичної змінної.

Для визначення поточного стану процесу руху АРПА необхідно порівняти дану нечітку ситуацію з кожної нечіткої ситуацією з деякого набору існуючих типових ситуацій  $S = (S_1, \dots, S_K)$ . в базі знань про можливі ситуаціях при переміщенні АРПА в різних конфігураціях місцевості.

В якості заходів для визначення ступеня близькості нечіткої ситуації  $S_{TEK}$  і  $S_k (k = \overline{1, K})$  з бази знань можна використовувати:

- ступінь нечіткого включення нечіткої ситуації  $S_{TEK}$  в нечітку ситуацію  $S_k$ ;
- ступінь нечіткого рівності  $S_{TEK}$  и  $S_k$ ;
- ступінь нечіткої спільності  $S_{TEK}$  и  $S_k$ .



Переймаючись однієї з обраних заходів близькості, можемо поставити деякі нечіткі відносини між ситуаціями, не тільки по відношенню до поточної  $S_{TEK}$ , а й між існуючими в базі знань даної предметної області.

З точки зору можливих переміщень АРПА найбільш зручною мірою близькості виникаючих ситуацій можна вважати ступінь нечіткого включення ситуації, яка характеризується деяким порогом включення, що визначаються розробником, виходячи з умов, в яких протікає рух АРПА. Поріг включення визначається, як і функції приналежності, в нормованому діапазоні  $[0,1]$  наступним чином:

$$t_{вкл.} \in [\alpha_{\min}, 1], \quad (1.3)$$

де  $\alpha_{\min}$  – нижня межа діапазону ступеня включення, зазвичай  $\alpha_{\min} = 0.6 \div 0.7$ .

У цьому випадку можемо говорити про те, наскільки нечіткі ознаки поточної ситуації  $S_{TEK}$  нечітко включаються в нечіткі значення відповідних ознак ситуації  $S_k (k = 1, K)$  [20].

Далі для існуючої бази знань ІСППР про функціонування АРПА в поставлених для нього завдань і умов його роботи в різних режимах експлуатації формуємо типові «нештатні» ситуації, для яких на основі експертних методів детально розроблені керуючі впливи [20]. При цьому можливий перехід від однієї типової «нештатної» ситуації  $S_k$  до другої  $S_l$  здійснюється за допомогою деякого рішення. Кожному можливого вирішення визначається ступінь переваги даного рішення  $\gamma_{kl}(S_k, R_{kl})$ . Таким чином, можна побудувати нечітку ситуаційну мережу (рис.1.8), на якій наочно видно можливі переходи від однієї типової («штатної») ситуації до іншої і ступінь переваги цих переходів.

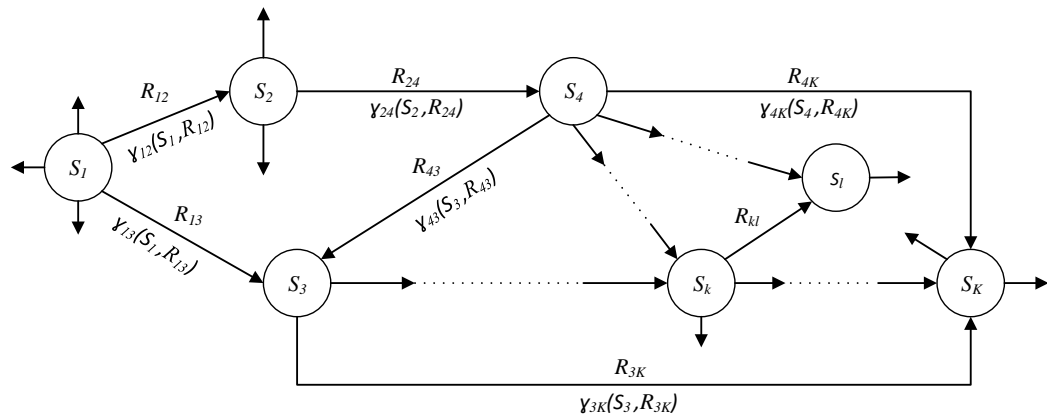


Рисунок 1.8. Нечітка ситуаційна мережа

Слід зазначити, що, як база знань щодо функціонування АРПА, так і ситуаційна мережа, носять еволюційний характер і періодично оновлюються за рахунок включення нової типової «нештатної» ситуації, зокрема, на основі методу «ПРОБА» [19]. Нові типи «нештатні» ситуації і заносяться в базу знань про функціонування АРПА. Стосовно до задачі руху АРПА в умовах невизначеності алгоритм роботи ІСППР можна трактувати наступним чином (рис.1.9) [20].

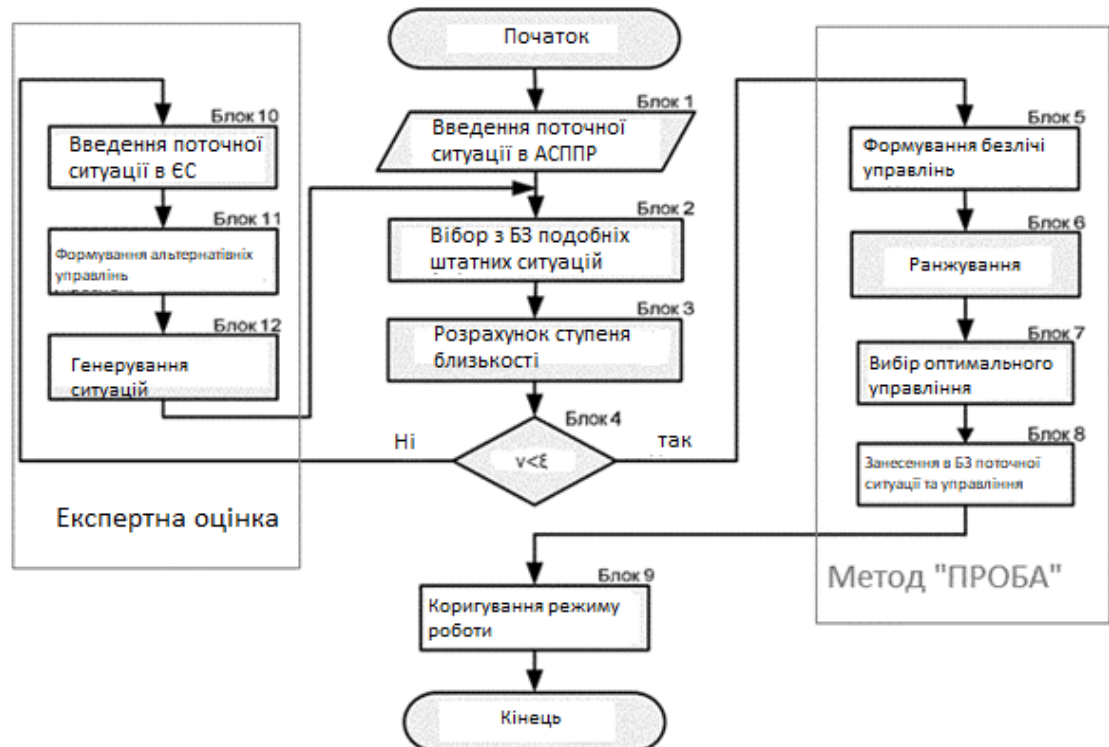


Рисунок 1.9. Алгоритм нечіткого ситуаційного управління АРПА

У блоці 1 здійснюється введення інформації про поточну ситуацію на маршруті руху АРПА, яка характеризується безліччю факторів. При цьому частина факторів вводиться в систему автоматично на підставі показань відповідних засобів вимірювань, а частина – це цільова моніторингова інформація. У самому загальному випадку інформація про поточну ситуацію буде характеризуватися як кількісними, так і якісними значеннями факторів.

У блоці 2 проводиться порівняння ситуації з безліччю типових («штатних») ситуацій, які знаходяться в базі знань (БЗ) і характеризуються тим же набором фактором, що і поточна. Таким чином, даний блок дозволяє обмежити безліч можливих ситуацій, для яких необхідно розрахувати ступінь близькості з поточною ситуацією. Це дозволить істотно скоротити час роботи алгоритму.

У блоці 3 здійснюється визначення ступеня близькості поточної ситуації і визначення подібних типових («штатних») ситуацій з блоку 2. Визначення ступеня близькості нечітких ситуацій необхідно для забезпечення необхідними даними алгоритму вибору керуючого рішення із матриць керуючих рішень, що зберігаються в базі «штатних» нечітких ситуацій.

У блоці 4 виконується порівняння розрахованого ступеня близькості, яке дає можливість відібрати найбільш близькі, до поточної «штатної» ситуації.

У блоці 5 здійснюється формування управлінь, відповідних відібраним у блоці 4 типовим "штатним" ситуаціям.

У блоках 6,7 відбувається ранжування по спаданню ефективності керуючих впливів всередині підмножини відібраних "штатних" ситуацій і визначення оптимальної серед них.

У блоці 8 здійснюється занесення оптимального управління і відповідної йому ситуації як «штатних» в базу знань про функціонування АРПА.

Слід зазначити, що блоки 5–8 реалізуються на основі запропонованого авторами в роботі [19] методу ПРОБА (ПРОцедура ОБробки Альтернатив)

У блоці 9 здійснюється коригування режиму роботи з урахуванням ситуації, що склалася і критеріїв ефективності роботи АРПА.

У блоці 10 поточна ситуація поміщається в експертне середовище (ЕС) і базу знань о функціонуванні АРПА в умовах невизначеності.

У блоці 11 у експертів даної предметної області (функціонування АРПА в умовах невизначеності) або ЛПР запитуються можливі керуючі впливу, які також поміщаються в базу знань.

У блоці 12 у експертів даної предметної області (функціонування АРПА в умовах невизначеності) або ОПР запитуються можливі ситуації, до яких може привести вибір того чи іншого генерованого ними керуючого впливу і також заносяться в базу знань.

### **Висновки до розділу**

1. Аналіз сучасного стану побудови АРПА показав, що зростаючі складності вирішуваних завдань зумовлюють необхідність використання сучасних підходів до проектування ІСУ АРПА з використанням ІСППР ситуаційного типу.

2. Аналіз основних завдань АРПА показав, що рух в цільову точку і повернення на базу є практично основним елементом у різних місіях АРПА і потребує дуже складної взаємодії агентів підсистем АРПА, в тому числі в умовах виникнення нештатних ситуацій, зумовлених як зовнішніми (непередбачені перешкоди), так і внутрішніми (несправності апаратної частини, збій програмного забезпечення, вичерпання запасу електроенергії) причинами.

## РОЗДІЛ 2. ФОРМУВАННЯ ОПТИМАЛЬНОГО МАРШРУТУ АРПА ТА АЛГОРИТМІВ ЙОГО РУХУ В УМОВАХ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ

### 2.1. Математична модель динаміки руху АРПА

Відомо, що всі реальні АРПА в тій чи іншій мірі є нелінійними і нестационарними. Аналіз і синтез систем оптимальної стабілізації програмного руху АРПА, в загальному випадку, є досить складною математичною проблемою. У загальному випадку, лінійна нестационарна модель динаміки АРПА може бути представлена у вигляді:

$$\dot{\bar{x}}(t) = A(t)\bar{x}(t) + B(t)\bar{u}(t), t \in [t_0, T_f], \bar{x}(t_0) = \bar{x}^{(0)},$$

де  $A(t) = \{a_{ij}(t)\}$ ,  $B(t) = \{b_{ik}(t)\}$  – матриці розміру  $n \times n$  та  $n \times m$

відповідно, вектор керуючих впливів необмежений  $\bar{u}(t) \in U = E^m, \forall t \in [t_0, T_f]$ .

При цьому в багатьох режимах руху АРПА можливий розгляд лінійних стаціонарних динамічних моделей АРПА, тобто при постійних значеннях коефіцієнтів матриць  $A(t), B(t)$ .

### 2.2. Детерміноване планування оптимального маршруту АРПА

Американський математик Р.Беллман запропонував загальний метод оптимізації – метод динамічного програмування. В основу методу покладено принцип оптимальності Р.Беллмана [17], ідея якого полягає в тому, що оптимальне управління визначається кінцевою метою і станом системи в даний момент часу, незалежно від того, яким чином система досягла цього стану. Розглянемо задачу про найкоротший шлях на мережі, яка відображає характерні точки підводного середовища в регіоні знаходження АРПА. Потрібно знайти найкоротший шлях АРПА з вершини (точки старту) 1 до вершини 10 (точки фінішу) на графі, зображеному на рис.2.1. Цифри на дугах означають довжини  $c_{ij}$  відповідних комунікацій. Застосуємо ідею динамічного програмування до розв'язання цієї задачі. Розв'язання задачі проводиться в кілька етапів. Етапи позначені на рис.2.1. Нехай  $f_k(x)$  – мінімальна відстань від вершини  $x$ , що належить  $k$ -му етапу до вершини 10,  $d_k(x)$  – вершина, до якої потрібно перейти

після вершини  $x$ , дотримуючись шляху мінімальної довжини. Якщо ми знаходимось на 4 – му етапі, то  $f_4(8) = 8$ ,  $d_4(8) = 8$ ,  $f_4(9) = 4$ ,  $d_4(9) = 10$ .

Таблиця 2.1. Результати розв'язування задачі

$x$	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$f_4(x)$								8	4
$d_4(x)$								10	10
$f_3(x)$					12	10	8		
$d_3(x)$					8,9	9	9		
$f_2(x)$		19	17	13					
$d_2(x)$		6	6	6					
$f_1(x)$	16								
$d_1(x)$	4								

Переходимо до 3-го етапу. З вершини 5, що належить третьому етапу, існує два можливих шляхи до вершини 10. Очевидно, що:

$$f_3(5) = \min \{4 + f_4(8), 8 + f_4(9)\} = \min \{12, 12\} = 12,$$

$$d_3(5) = 8 \text{ або } 9.$$

Аналогічно знаходимо всі величини  $f_k(x)$  та  $d_k(x)$ . Результати наведені в таблиці.

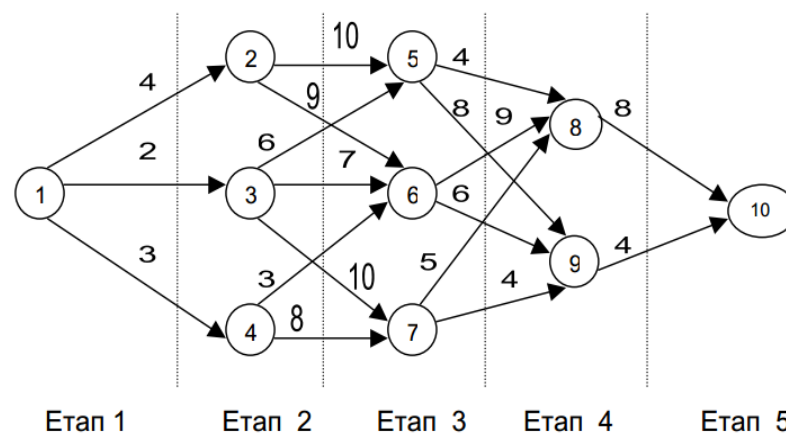


Рисунок 2.1. Граф задачі динамічного програмування

З таблиці випливає, що довжина найкоротшого шляху з вершини 1 до вершини 10 дорівнює 16, а оптимальним маршрутом є  $1 \rightarrow 4 \rightarrow 6 \rightarrow 9 \rightarrow 10$ . Цей маршрут будується згідно з  $d_k(x)$ :

$$1 \rightarrow d_1(1) = 4 \rightarrow d_2(4) = 6 \rightarrow d_3(6) = 9 \rightarrow d_4(9) = 10.$$

Зауважимо, що якщо  $c_{ij}$  – собівартість перевезення вантажу по відповідній комунікації, то розглянута задача еквівалентна пошуку шляху мінімальної собівартості з вершини 1 до вершини 10. Мінімальний шлях можна також розглядати як оптимальну траєкторію руху в прийнятій системі координат.

Відмітимо ще раз, що по мірі просування від вершини 10 до 1 послідовно із розгляду виключаються неоптимальні траєкторії, що значно спрощує пошук оптимальної траєкторії. Цей приклад ще раз пояснює принцип оптимальності, що будь-який відрізок оптимальної траєкторії також є оптимальним, а майбутня поведінка процесу не залежить від його передісторії, тобто поведінки системи до початку управління.

У загальному випадку для  $(m+1)$  етапів, коли кожен з  $m$  етапів має  $l$  альтернатив, критерій оптимальності є функцією  $(l \times m)$  змінних. Для малих значень  $m$  та  $l$  оптимальний розв'язок можна знайти методом простого перебору можливих варіантів. Однак застосування динамічного програмування значно скорочує обсяг обчислень на комп'ютері. В даному випадку задача знаходження оптимального значення критерію, що залежить від  $m$  змінних, кожна з яких може приймати  $l$  значень, зводиться до послідовності пошуку розв'язків більш простої задачі оптимізації функції одної змінної, що приймає  $l$  значень. Тобто у методі динамічного програмування задача вибору одного із  $(l \times m)$  варіантів зводиться до послідовного вибору всього з  $l$  варіантів. Наприклад, для  $m = l = 10$  вибір з 1010 варіантів зводиться до послідовного перебору всього 10 варіантів.

Слід відзначити, що при руху АРПА по програмному маршруту на його окремих ділянках можуть виникнути нештатні ситуації, які потребують прийняття оперативних рішень, що потребує використання ІСППР.

### **2.3. Ситуаційне планування оптимального маршруту АРПА**

Для виконання місії при непередбачених обставинах виняткове значення має «інтелектуалізація» системи управління АРПА з елементами штучного інтелекту. Використання традиційних методів планування, в даному випадку, неможливо через ймовірне виникнення на маршруті непередбачених ситуацій. Звідси, ситуаційний підхід в прийнятті рішень при плануванні маршруту АРПА

дозволяє не тільки оцінити можливу ситуацію на маршруті, але і визначити управлінські рішення для оперативного коректування маршруту з використанням інтелектуальної системи підтримки прийняття рішень. (ІСППР) Розробка моделей процесу маршрутизації заснована на уявленні ситуаційної моделі у вигляді вузлів графа, переходи якого відповідають керуючим рішенням. Будемо вважати, що на АРПА бортова обчислювальна навігаційна апаратура, а також СТЗ, що дозволяє при наявності необхідної інформації на базі ІСППР планувати маршрут і здійснювати коригувальні управлінські рішення (оперативне управління) при виникненні непередбачуваних ситуацій.

Нехай ситуаційний крок представляється формулою  $S_{net} : S_j \rightarrow U_k \rightarrow SI_j$ , де  $S_{net}$  – виконання опорного плану;  $S_j$  – поточна ситуація (вузол  $W_j$ );  $SI_j$  – нова ситуація (вузол  $W_j$  – корекція опорного плану);  $U_k$  – вибір маршруту в «невизначеній» ситуації (рис.2.2) [48]. Ситуаційна мережа  $S_{net}$  представлена у вигляді орієнтованого графа  $S_{net}=(W,A)$ , де  $W$ –множина вузлів(станів),а  $A$  – множина дуг–переходів між станами графу, тобто

$$S_{net} = (W, A);$$

$$W = (w_i | i=1, \dots, N);$$

$$A = (a_{i,j} | i=1, \dots, N; j=1, \dots, N)$$

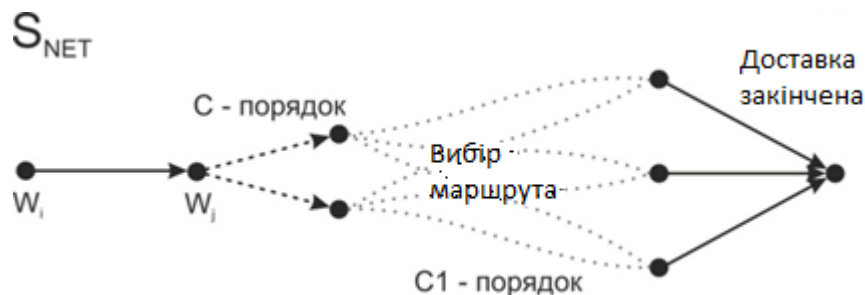


Рисунок .2.2. Схема вибору маршруту і оперативного управління

Прийняття рішень в загальному вигляді можна розглядати як перетворення ієрархічних структур, що реалізується двома способами, що відображають характер зміни цих структур від вихідної до заданої [3]. При першому способі вихідна ситуація є початковою  $S(\tau_0)$  і вибирається такий ланцюжок послідовного виконання операцій  $R_{jk} (k = 1, 2, \dots, T-t_0)$ , яка веде до заданої ситуації  $S_T = S(T)$ . Зазначений процес можна представити наступною послідовністю:



$$\frac{1}{\sqrt{\pi}} \sum_{j=0}^{\infty} \frac{(-1)^j}{(2j+1)!} \left( \frac{d}{dx} \right)^{2j+1} f(x) = -f'(x). \quad (2.1)$$

Зазначена послідовність може бути визначена тріадою  $S(\tau_0)RS(T)$ , тобто по  $S(\tau_0)$  і  $S(\tau_0 + i)$  відшукується  $R_i$ . У цьому випадку процес знаходження  $R_k$  може бути представлений індуктивної ланцюжком послідовного знаходження станів  $S(\tau_0 + k)$ .

При другому способі використовується так званий зворотній рух. В якості початкової ситуації  $S(\tau_0)$  виступає задана ситуація  $S(T)$ , а в якості мети  $S(T)$  – вихідна ситуація  $S(\tau_0)$ . Так само як і при першому способі відшукується ланцюжок операцій  $R_{jk}$ , яка переводить  $S(\tau_0) = S(T)$  в  $S(T) = S(\tau_0)$ , тобто реалізується послідовність (2.1), але в зворотному порядку. При визначенні загального перетворення  $R$  послідовність операцій, також як і в першому випадку, скоротиться до тріади. Тут також є схема індуктивного рішення, однак процес знаходження  $R_{jk}$  носить дедуктивний характер, тобто по  $S(T)$  відшукується  $S(T - \tau_0)$  і т.д.

В обох способах процес вирішення передбачає виключення з розгляду заборонених ситуацій. При цьому зазвичай використовується минулий досвід. Таким чином, завдання визначення оптимальної стратегії процесу прийняття рішень полягає у визначенні таких складових  $r_{ijk}$  матриці виграшів  $R_k$ , які для деяких стратегій  $k$  принесуть максимальний виграш. При цьому, як в першому, так і в другому випадку на практиці можливі два шляхи оптимізації прийнятих оператором рішень.

Перший шлях полягає у виборі рішень з порівняно невеликого набору можливих варіантів, а критерієм служить відхилення від оптимального способу вирішення, тобто помилки. Обмеженням тут виступає час прийняття рішень.

Другий шлях відповідає режиму роботи, при якому основна увага звертається на неприпустимість помилок. Час прийняття рішення змінюється при цьому в широких межах, а критерієм оптимальності прийнятих рішень є час, протягом якого знайдені найкращі рішення.

Розглянемо перший зі згаданих шляхів оптимізації. Для керованої системи з  $N$  можливими станами  $i = 1, \dots, N$ . У кожному стані  $i$  оператор може прийняти

$A_i$  можливих рішень (стратегій), сукупність яких для всіх станів системи в розглянутий інтервал часу становить політику оператора. Стратегія оператора може бути виражена як матриця перехідних ймовірностей  $p_{ij} = \| p_{ijk} \|$  від стану  $i$  до стану  $j$ . Наведемо їй у відповідність матрицю виграшів  $R_k = \| r_{ijk} \|$ , одержуваних від реалізації кожного рішення оператора.

Якщо проводиться аналіз пошуку оптимальної стратегії на кінцевому інтервалі часу, то може бути оцінений загальний виграш від тієї чи іншої політики оператора.

При цьому очевидно, що система управління переходить з одного стану в інший через рівні інтервали часу. Вважаючи, що післядія відсутня, процес прийняття рішень можна описати апаратом теорії марківських процесів.

Крім того, для аналізу стратегій на кінцевому інтервалі часу, коли є набір можливих варіантів рішень, для отримання еталонної оптимальної стратегії пропонується використовувати стандартну процедуру методу динамічного програмування [14].

В цьому випадку повний очікуваний виграш за  $n$  кроків буде дорівнює:

$$v_i(n) = \sum_{j=1}^N p_{ij} [r_{ij} + v_j(n-1)] = \sum_{j=1}^N p_{ij} r_{ij} + \sum_{j=1}^N p_{ij} v_j(n-1) \quad (2.2)$$

$$\text{або } v_i(n) = q_i + \sum_{j=1}^N p_{ij} v_j(n-1),$$

де  $q_i = \sum_{j=1}^N p_{ij} r_{ij}$  – мінімальний очікуваний виграш, а оптимальна стратегія буде відповідати критерію оптимальності  $(n+1)$ -го рішення:

$$v_i(n+1) = \max_k \{q_i + \sum_{j=1}^N p_{ij} v_j(n)\}, k=1, \dots, \Delta_i, i=1, \dots, N. \quad (2.3)$$

При другому шляху оптимізації при необмеженому часі виконання завдання сумарний виграш системи також зростає необмежено, тому політику управління можна оцінювати за середнім очікуваному доходу від реалізації одного рішення.

У цьому випадку завдання пошуку оптимальної стратегії можна розглядати за окремими актами прийняття рішень незалежно від інтервалів часу, в які вони реалізуються.

Для знаходження такої політики можна скористатися ітеративним процесом. Якщо політика управління фіксована, то пошук оптимальної стратегії зводиться до вирішення системи рівнянь:

$$q + v_i = g_i + \sum_{j=1}^N p_{ij} v_j \quad (2.4)$$

з використанням критерію

$$q^k = \max_k \{ g_i^k + \sum_{j=1}^N p_{ij}^k v_j - v_i \} \quad (2.5)$$

Загальна процедура пошуку оптимальної стратегії прийняття рішень при фіксованих  $v_i$  зводиться до наступного. При фіксованій політиці  $A$  вирішується система рівнянь (2.4), причому в ній  $v_j$  при  $j = N$  вважається рівним нулю (оскільки нам важливі різниці  $v_i - v_j$  відносних ваг, а не їх абсолютні значення).

Потім знайдені ваги  $v_i^A$  підставляються в формулу (2.5), і для кожного  $i$  знаходиться максимальне значення критерію, і набір стратегій, на якому досягається максимальне середнє значення критерію, приймається за нову політику  $A_1$ .

При другому шляху реалізації процесу прийняття рішень час прийняття окремих рішень коливається в широких межах за рахунок досягнення точного рішення на основі апарату теорії напівмарківських процесів. При цьому система управління перед тим як перейти зі стану  $i$  в стан  $j$ , знаходиться в стані  $i$  випадкове час  $\tau_{ij} = m$  з щільністю розподілу  $f_{ij}(\tau_{ij} = m) = N(\tau_{ij} = m)$ . Значенням  $f_{ij}(m)$  визначається ймовірність того, що система в стані  $i$  проводить рівно  $m$  одиниць часу, перш ніж перейти в  $j$ . Якщо політика рішень оператором описується як напівмарківський процес, то оптимальна стратегія  $k$  в стані  $i$  може бути обрана на підставі аналізу перехідних ймовірностей  $p_{ij}^k$ , щільності розподілу  $h_{ij}^k(m)$ , а також системних виграшів типу  $y_{ij}^k(l)$  і  $b_{ij}^k(m)$ . Тут  $b_{ij}^k(m)$  – системний виграш від переходу системи, яка перебувала протягом часу  $m$  в стані

зі стану  $i$  в стан  $j$  при  $k$ -й оптимальної стратегії,  $y_{ij}^k(l)$  – виграш від перебування системи в даному стані протягом тимчасового інтервалу  $(l-1, l)$ , пропорційний деякої нормі виграшу за одиницю часу при  $k$ -й оптимальної стратегії.

При таких припущеннях завдання може бути сформульована як задача максимізації однокрокового виграшу, або як завдання максимізації повного очікуваного доходу. Як і при марківських процесах будемо розглядати напівмарковські процеси кінцевої і нескінченної тривалості. У першому випадку завдання полягає у визначенні політики управління, яка максимізує повний очікуваний виграш від процесу, до кінця функціонування якого залишилося  $n$  одиниць часу. У разі процесів нескінченної тривалості завдання може бути сформульована або як завдання максимізації однокрокового виграшу (аналогічно завданню для марківських процесів нескінченної тривалості), або як завдання максимізації повного очікуваного доходу. У загальному вигляді можна оперувати критерієм, одержуваних у відповідність до принципу оптимальності Беллмана [14]:

$$v_i(n) = \max_k \left\{ \sum_{j=1}^N p_{ij}^k \sum_{m=n+1}^{\infty} f_{ij}^k(m) \left[ \sum_{l=1}^{n-1} y_{ij}^k(l) + v_i(0) \right] + \sum_{j=1}^N p_{ij}^k \sum_{m=0}^n f_{ij}^k(m) \left[ \sum_{l=0}^{m-1} y_{ij}^k(l) + r_{ij}^k(m) + v_j(n-m) \right] \right\} \quad (2.6)$$

де  $i=1,2,\dots,N$ ,  $n=1,2,\dots$ .

Середній очікуваний дохід  $r_i$  від перебування системи в стані  $i$  і відходу з цього стану при тривалому функціонуванні процесу буде:

$$r_i = \sum_{j=1}^N p_{ij} \sum_{m=0}^{\infty} h_{ij}(m) \left[ \sum_{l=0}^{m-1} y_{ij}(l) + b_{ij}(m) \right]. \quad (2.7)$$

Слід зауважити, що для процесів з одним ергодичним класом, коли гранична ймовірність  $i$ -го стану не залежить від початкового стану, прибуток однаковий для всіх станів процесу.

Політику, оптимальну в сенсі максимізації однокрокового прибутку процесу, тобто середнього очікуваного доходу за одиницю часу, можна знайти за допомогою ітеративного процесу, описаного вище і використовує критерій

$$q^k = q_i^k + \frac{1}{\tau_i^k} \left[ \sum_{j=1}^N p_{ij} v_j - v_i \right] \rightarrow \max_k \quad (2.8)$$

## **2.4. Алгоритм руху АРПА в умовах невизначеності рельєфу типу «тунель/ущілина»**

Для реалізації руху АРПА по заданій траєкторії необхідно сформувати інформаційну модель зовнішнього середовища, наприклад, використовуючи спосіб завдання «квазіциліндричних сегментів» за допомогою зрізів, крім абсолютно відкритого простору. Під «квазіциліндричним сегментом» будемо розуміти відрізок рельєфу місцевості на шляху руху АРПА з урахуванням штучних (коридори затоплених будівель, мостів, арок і ін.) І природних перешкод (підводні тунелі, ущелини, нагромадження валунів і ін.). При цьому верхня межа «квазіциліндричного сегмента» повинна бути суттєво вище за діаметр АРПА. У разі відсутності верхньої межі на якомусь етапі руху робота, вона задається штучно при той же вимозі щодо габаритів АРПА. Для вирішення даного завдання в автономному режимі інтелектуального АРПА необхідно мати систему технічного зору і відповідне програмне забезпечення.

Визначення положення АРПА щодо навколишньої місцевості проводиться за допомогою різних систем технічного зору. Максимальна точність позиціонування досягається при використанні лазерних далекомірів зі скануючим променем, що визначають положення перешкоди на відстані до 50 м з точністю до 0,01 м. Для визначення положення АРПА в пов'язаній системі координат (ПСК) найбільш доцільно використовувати комплексні системи орієнтації та навігації, що об'єднують інформацію глобальної супутникової навігації (GPS), інерційних, магнітних та інших датчиків інформації про становище робота. Дослідження показали, що, об'єднав інформацію приймача GPS, сучасних серійних мікромеханічних гіроскопів, акселерометрів, і одометрів, можна визначати положення АРПА в ПСК з точністю до 0,15 м, а при використанні оптоволоконних гіроскопів – до 0,05 м.

Це дозволить обстежити і розпізнати 3D-конфігурацію справжнього і кожен наступну «квазіциліндричного сегмента» з метою прийняття рішення про подальші дії згідно алгоритму прийняття рішень, закладеного в інтелектуальній системі управління АРПА. Для цього в програмному забезпеченні АРПА

повинна бути передбачена можливість імітувати процес отримання даних далекомірів і процедура прийняття рішення про подальший рух робота. Для ефективності отримання більш повної інформації про обстежуваний «квазіциліндричний сегмент» промені далекоміра не повинні бути паралельні один одному. Переміщаючись на деякий кут, далекоміри маніпулятора покривають передню півсферу перед місцем установки далекомірів на кінці маніпулятора. Оскільки за допомогою променів далекомірів можна обстежити лише невелику частину «квазіциліндричного сегмента» поблизу АРПА, так як з видаленням від АРПА відстань між променями АРПА збільшується і перешкоди пропускаються, модель «квазіциліндричного сегмента» необхідно складати з малих прилеглих один у одного частин, які будуть відновлюватися у міру руху АРПА по «квазіциліндру». Для створення моделі розраховується відстань до перетину променів на основі відомих даних про кути, під якими випущені промені далекомірів. Зміна параметрів юстирування далекомірів маніпулятора дозволяє змінювати дальність видимості променів далекомірів, діапазон кутів за допомогою яких відновлюється частина «квазіциліндра» за один крок, тобто поточний «квазіциліндричний сегмент. Отже усі сегменти будуть відновлюватися в міру руху АРПА по «квазіциліндру». Візуалізація 3D сцени рельєфу місцевості є підставою для вирішення основного завдання, а саме, планування траєкторії руху АРПА в умовах невідомого рельєфу з можливістю автоматичної підказки прийняття рішень в «нештатних» ситуаціях

#### 2.4.1. Метод відновлення геометрії рельєфу

Для відновлення геометрії рельєфу місцевості пропонується метод відновлення геометрії просторових об'єктів з використанням тріангуляції координат точок зрізу [24], графічна інтерпретація якого наведена на рис.2.3.

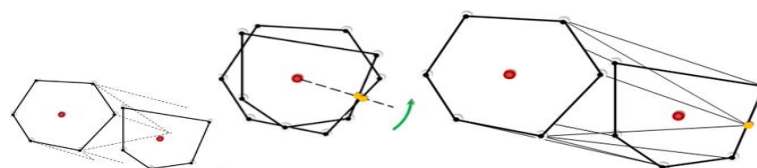


Рисунок.2.3. Графічна інтерпретація методу відновлення геометрії просторових об'єктів.

На рисунку 2.4 приведена блок-схема алгоритму побудови моделі «квазіциліндра» за даними зрізів з різною кількістю точок. Суть методу полягає в тому, що перебираючи всі зрізи «квазіциліндра» і формуючи пари по два зрізу (верхній і нижній), знаходимо полігони між ними. Для цього потрібно спроектувати обидва зрізи на площину, поєднати їх центри та з центру провести промінь в такому напрямку, щоб він перетнув по одному ребру в обох зрізах.

Далі визначаємо параметри обходу точок зрізів. Обхід точок повинен проходити в обох зрізах в однакових напрямках, починаючи від точок знайдених ребер. Потім необхідно занести послідовно всі точки верхнього зрізу в список – згідно обраного напрямку, то ж саме провести з другим зрізом.

Потім проводимо розрахунок відстані між першими і останніми елементами отриманих списків, знаходимо найбільше з них, визначаємо в якому списку більше точок, і з того списку, де точок більше, видаляємо крайню точку (відстань до якої є найбільшим), побудувавши спочатку з її участю полігон. Якщо в обох списках рівну кількість точок, то беремо перші елементи списків і підраховуємо відстані від першого елемента одного списку до іншого елемента другого списку. Відстань, яка є найбільшою, видаляємо зі списку після побудови полігону з його участю. Так продовжуємо, поки в списках не залишиться по одній точці. Далі визначаємо параметри обходу точок зрізів. Обхід точок повинен проходити в обох зрізах в однакових напрямках, починаючи від точок знайдених ребер. Потім необхідно занести послідовно всі точки верхнього зрізу в список – згідно обраного напрямку, то ж саме провести з другим зрізом. Потім проводимо розрахунок відстані між першими і останніми елементами отриманих списків, знаходимо найбільше з них, визначаємо в якому списку більше точок, і з того списку, де точок більше, видаляємо крайню точку (відстань до якої є найбільшим), побудувавши спочатку з її участю полігон. Якщо в обох списках рівну кількість точок, то беремо перші елементи списків і підраховуємо відстані від першого елемента одного списку до іншого елемента другого списку. Відстань, яка є найбільшою, видаляємо зі списку після побудови полігону з його участю. Так продовжуємо, поки в списках не залишиться по одній точці.

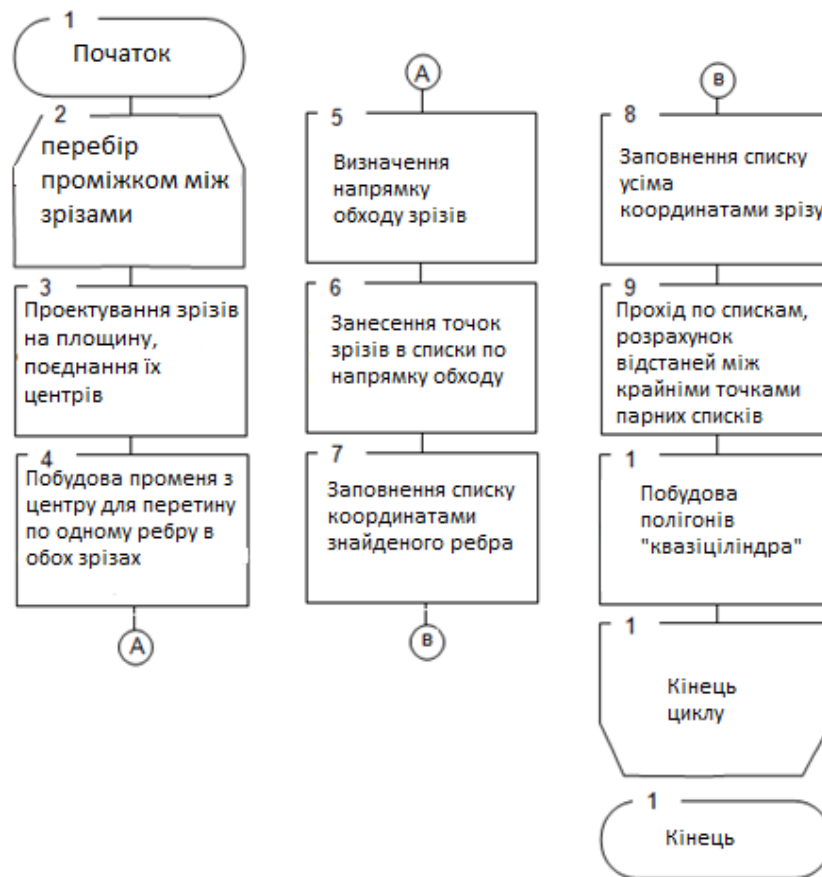


Рисунок 2.4. Блок-схема алгоритму побудови моделі «квазіциліндра»

### 2.4.2. Синтез траєкторії руху АРПА

Для синтезу траєкторії руху АРПА в умовах невідомого рельєфу в роботі [24] пропонується використовувати математичну модель «квазіциліндра» у вигляді матриці такого вигляду:

$$A = (a_{ij})_{i=1, j=1}^{n, m} \quad (2.9)$$

де  $a_{ij}$  – координати точки,  $n$  – кількість зрізів,  $m$  – максимальна кількість точок зрізу, при цьому зрізи можуть складатися з різної кількості точок. Визначення центрів зрізів, заданих матрицею  $A$ , пропонується знаходити з використанням виразу:

$$C_i = \frac{\sum_{j=1}^m a_{ij}}{m} \quad (2.10)$$

де  $C_i$  – центр  $i$ -ого зрізу ( $i = 1..M$ ),  $m$  – кількість точок цього зрізу.

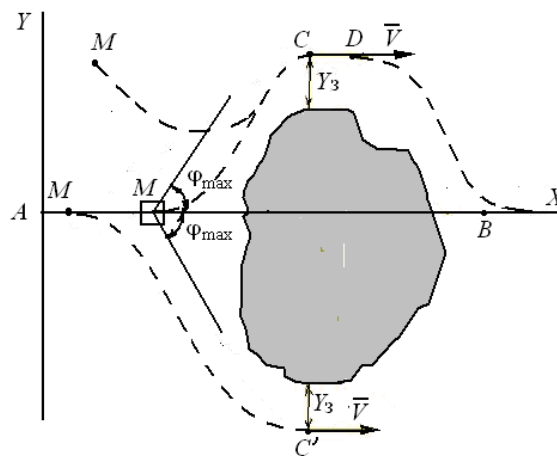
Знайдені  $m$  точок центрів зрізу далі коригуються за критерієм найбільшої відстані від кордонів зрізу. В результаті формується масив центрів зрізів  $C$ , використовуючи який будується траєкторія руху маніпулятора. Після цього



відкориговані центри зрізів проектуються на поверхню землі і вертикальний зріз робота по точці центра ваги (максимальна по площі конфігурація робота) перевіряється на предмет вільного проходження даного АРПА вздовж розрахованої траєкторії на кожному з зрізів в даному «квазіциліндрі», тобто в реальному масштабі часу. Вся синтезована таким чином траєкторія руху АРПА буде складатися з оптимальних траєкторій окремих «квазіциліндричних сегментів».

## 2.5. Алгоритм руху АРПА в умовах невизначеності рельєфу типу «одиначна перешкода»

Нехай необхідно, щоб АРПА перемістився з точки А в точку В горизонтальній площині (рис.2.5) по траєкторії, мінімально відхиляється від прямої, що з'єднує ці точки (переміщення по прямій лінії неможливо через перешкоди довільної форми) [22]. Для ясності подальших міркувань припустимо, що перешкода суцільне і несиметричне відносно прямої АВ (рис. 2.5).



Риунок.2.5. Формування траєкторії обходу перешкоди

АРПА може огинати перешкоду, обходячи його з різних боку, проте один з напрямків обходу буде вимагати більшого відхилення від прямої АВ і, відповідно, має бути виключено. Крім того, в якій точці траєкторії, найбільш віддаленої від прямої АВ (точки  $C$  і  $C'$  на рис.2.5), вектор швидкості АРПА повинен бути їй паралельний і між АРПА і перешкодою повинно залишатися деякий задану відстань  $Y_3$ . Для виявлення перешкод місцевості на корпусі АРПА

встановлюється спеціальний датчик. Їм може бути лазерний далекомір з променем, який сканує в горизонтальній площині (ЛДС), кут сканування якого дорівнює  $2j_{max}$ , причому  $j_{max}$  не менш максимального кута, який може становити траєкторія руху робота з прямою АВ. Припустимо, що вісь симетрії сектора сканування променя ЛДС паралельна прямій АВ, а кут відхилення променя ЛДС від осі симетрії сектора  $-j$  змінюється дискретно з інтервалом  $Dj$ . Далекомір при кожному  $i$ -му вимірі визначає кут нахилу променя  $j_i$  і відстань до перешкоди  $l_i$ , що дозволяє обчислити координати видимих далекоміром точок перешкоди в пов'язаної з об'єктом системи координат. Всього за напівперіод сканування буде отримана інформація про відстань до  $n = (2j_{max} / Dj) + 1$  точок перешкоди. На корпусі АРПА встановлені також два лазерних далекоміра з нерухомими променями, що вимірюють відстань від АРПА до перешкод в напрямку перпендикулярному прямій АВ. Положення центру мас АРПА в нерухомій системі координат АХУ (рис.2.5), перші похідні цих координат і орієнтація АРПА в цій системі координат визначаються за допомогою комплексної інерційної системи навігації та орієнтації і коректується за показаннями диференціальних GPS-датчиків.

Спрощену математичну модель руху центру мас АРПА вибираємо у вигляді кінематичних диференціальних рівнянь плоского руху матеріальної точки [22]:

$$\frac{dY_M}{dt} = V_M \sin \Psi_M; \quad \frac{dX_M}{dt} = V_M \cos \Psi_M; \quad \frac{d\Psi_M}{dt} = \Omega_M; \quad (2.11)$$

де  $Y_M, X_M$  – координати спрощеної моделі об'єкта в ПСК АХУ (рис.2.4);  $V_M$  – модуль вектору швидкості центру мас моделі;  $\Psi_M$  – кут повороту траєкторії, причому

$$\Psi_M(t) = \arctg Y_M(t) / X_M(t); \quad (2.12)$$

$\Omega_M$  – кутова швидкість обертання вектору  $V_M$  щодо вертикальної осі ОZ;  $n_\tau$  – потужність двигунів. Считаем, что  $V_M = kn_\tau = const$ .

В рівняннях (2.11)  $X_M, Y_M, \Psi_M$  розглядатимемо як змінні моделі;  $\Omega_M, n_\tau$  – як управління, які далі будемо називати програмними.

На змінні і управління спрощеної моделі АРПА накладені обмеження

$$-\Psi_{\max} \leq \Psi_M \leq \Psi_{\max}; -\Omega_{\max} \leq \Omega_M \leq \Omega_{\max} - n_{\tau \max} \leq n_\tau \leq n_{\tau \max}. \quad (2.13)$$

Перше з нерівностей (2.13) обмежує кут повороту програмної траєкторії, друге – радіус кривизни траєкторії, третє – враховує кінцеву потужність тягових двигунів. Величини обмежень слід вибирати так, щоб динамічні властивості АРПА дозволяли йому відстежувати «рух» моделі [22].

Необхідно, щоб АРПА перемістився з деякою околиці опорної точки А в опорну точку В (рис.2.5) по траєкторії, мінімально відхиляється від прямої, що з'єднує ці точки. Причому переміщення по прямій лінії неможливо через перешкоди довільної форми, відомої тільки частково. В даному випадку очевидно, що верхня траєкторія буде коротша. АРПА повинен обійти перешкоду так, щоб відстань між ним і перешкодою, ніколи не була менше забороненої відстані  $\Delta z = (Y_z + X_z)^{1/2}$  уздовж нормалі для відповідних точок моделі і горизонтального зрізу контуру перешкоди. При цьому в точках  $C$  і  $C^I$   $\Delta z = Y_z$ . Звідси точки на програмній траєкторії обходу перешкоди повинні задовольняти співвідношенням

$$X_{Mi} = X_{ni} + X_z; Y_{Mi} = Y_{ni} + X_z, \quad (2.14)$$

де  $X_{ni}, Y_{ni}$  – координати  $i$ -й точки перешкоди.

Будь-який маневр по обходу перешкоди можна представити у вигляді сукупності кількох траєкторій, в даному випадку, двох:

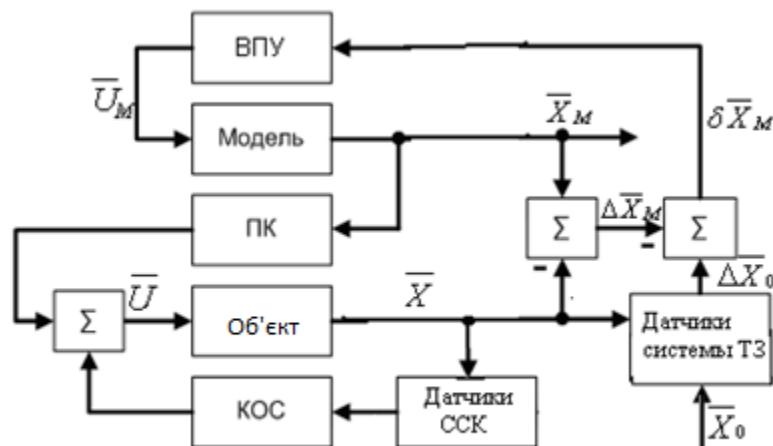
- перехід в точку, що знаходиться на піку видимості системи технічного зору (СТЗ), тобто точки  $C$  (або  $C^I$ );
- перехід з точки  $C$  (або  $C^I$ ) до осі  $AX$ .

При цьому СТЗ повинен за кожен напівперіод сканування аналізувати всі «видимі» точки перешкод, щоб робот, як зазначалося вище, був постійно видалений на відстань не менше  $\Delta z$  від відповідних точок, що лежать на горизонтальному зрізі контуру перешкоди.

Будемо вважати, що нами отримано горизонтальний зріз контуру перешкоди. Тоді, для знайдених згідно (2.14) дискретних точок моделі  $X_{Mi}$ ,  $Y_{Mi}$  здійснюємо сплайн-наближення [26] з метою отримання аналітичного виразу для програмної траєкторії обходу роботом перешкоди, тобто:

$$Y_{Mi} = f(X_{Mi}). \quad (2.15)$$

Підставив (2.15) в рівняння (2.11), знаходимо програмне керування  $U_{np}(t) = M_{np}(t)$ , яке подаємо на органи управління АРПА. Оскільки ми використовували спрощену модель динаміки АРПА, на виході буде існувати неузгодженість між змінними АРПА і моделі. Дану неузгодженість разом з коригувальним сигналом від СТЗ подаємо на вхід АРПА для його усунення. У загальному випадку, для довільного типу АРПА і його спрощеної моделі узагальнена структура системи автоматичного управління (САУ) обходу інтелектуальним роботом перешкоди приведена на рис.2.6. [22].



Риунок.2.6. Структура системи автоматичного управління обходу АРПА одиночної перешкоди

Тут  $\bar{X}$ ,  $\bar{X}_0$ ,  $\bar{X}_M$  – вектори поточного, бажаного кінцевого станів робота і поточного стану моделі в ПСК;  $\bar{U}$  – вектор управлінь об'єкта;  $\bar{U}_M$  – вектор управлінь моделі; ВПУ – обчислювач програмного управління; Об'єкт – об'єкт управління; «Модель» – спрощена математична модель об'єкта управління, на основі якої синтезовано алгоритм вибору програмного управління; ПК і КОС – відповідно, канали прямого і зворотного зв'язку регулятора, синтезовані,

виходячи з умови найкращого можливого відстеження об'єктом координат моделі; «Датчики ССК» – датчики положення робота в ПСК; «Датчики ТЗ» – датчики системи технічного зору [22].

Дана структура САУ складається з двох послідовно включених підсистем, одна з яких формує програмну траєкторію, а інша формує програмне управління і відстежує програмну траєкторію з використанням механізмів мінімізації відхилень від останньої. Зокрема, блок КОС може бути реалізований на основі запропонованої в статті [23] модальної стабілізації програмного руху динамічних об'єктів.

Для заздалегідь невизначеного рельєфу перешкоди структура системи автоматичного управління обходу АРПА перешкоди залишається тією ж, тільки в ній в ВПУ додається блок розпізнавання рельєфу на основі GPS і СТЗ робота згідно алгоритму [24] в реальному масштабі часу. У цьому випадку її структура буде відповідати структурі широко поширеному останнім часом методу MPC (model predictive control) – методу оптимізації динамічних систем з прогнозуючою моделлю [29], розглянутого автором у розділу 3.3.

### **Висновки до розділу**

1. Розроблені детермінований на основі методу динамічного програмування і ситуаційний на основі апарату марківських процесів алгоритми планування оптимального маршруту АРПА для різних критеріїв якості і в різних умовах функціонування.
2. Розроблені алгоритми управління АРПА, які можуть, крім штатних режимів, працювати і при невизначеності рельєфу підводних перешкод різного типу.

## РОЗДІЛ 3. СТАБІЛІЗАЦІЯ ПРОГРАМНОГО РУХУ АРПА

### 3.1. Модальна стабілізації програмного руху АРПА

Розглянемо лінійний стаціонарний повністю керований АРПА, динаміка якого в режимі стабілізації описується рівнянням [23,25]

$$\begin{aligned}\dot{\bar{x}} &= A\bar{x} + Bu, \\ \bar{y} &= C\bar{x},\end{aligned}\tag{3.1}$$

де  $\bar{x}^T = (x_1, x_2, \dots, x_n)$  – вектор стану;  $\bar{y}^T = (y_1, y_2, \dots, y_n)$  – що вимірює вихідний вектор;  $u$  – скалярна взаємодія;  $A, B, C$  – матриці коефіцієнтів розмірністю  $n \times n, n \times 1, m \times n$  відповідно, причому,  $0 < m \leq n$ .

Знайти управління  $\bar{u}(t) \in E^m$ , яке переводить лінійну нестационарну модель руху АРПА (3.13) із заданого початкового стану  $\bar{x}(t_0)$  в нульове кінцеве  $\bar{x}(T_f) = \bar{0}$  за фіксований інтервал часу  $[t_0, T_f]$  і мінімізує функціонал

$$I = \frac{1}{2} \{ \bar{x}^T(T_f) F \bar{x}(T_f) + \int_{t_0}^{T_f} [\bar{x}^T(t) Q(t) \bar{x}(t) + \bar{u}^T(t) R(t) \bar{u}(t)] dt \},\tag{3.2}$$

Передбачається, що  $F=0$  і математичні припущення щодо матриць  $Q(t), R(t)$  відповідають фізичним вимогам, що пред'являються до системи стабілізації і виключають можливість великих і тривалих відхилень координат стану і енергоресурсів при оптимальному процесі стабілізації програмного руху АРПА.

Відомо [23,26], що для повністю вимірюваних ( $m = n, c = I$ ) систем виду (3.13) в випадку квадратичного критерію якості екстремальне управління є лінійною функцією стану

$$u = \bar{p}^T \bar{x},\tag{3.3}$$

причому, вектор коефіцієнтів зворотних зв'язків  $\bar{p}$  можна вибрати таким чином, що полюси замкненої системи (3.1) через (3.3) будуть розташовуватися в наперед заданих довільних точках, які забезпечують необхідні динамічні властивості.

Таким чином, задача зводиться до вибору оптимальної області розташування полюсів і визначення по ним коефіцієнтів зворотних зв'язків.

Припустивши спочатку, що полюси заздалегідь відомі, покажемо метод визначення таких коефіцієнтів  $p_i$  ( $i = \overline{1, n}$ ), які лінійно входять до виразу для коефіцієнтів характеристичного полінома замкненої системи[6]:

$$H(\lambda) = |A + B\bar{p}^T - I\lambda| = \begin{vmatrix} a_{11} + b_1 p_{1-\lambda} & \dots & a_{1j} + b_1 p_j & \dots & a_{1n} + b_1 p_n \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ a_{j1} + b_j p_1 & \dots & a_{jj} + b_j p_{j-\lambda} & \dots & a_{jn} + b_j p_n \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ a_{n1} + b_n p_1 & \dots & a_{nj} + b_n p_j & \dots & a_{nn} + b_n p_{n-\lambda} \end{vmatrix} \quad (3.4)$$

Дійсно, нехай  $\exists b_k/b_k \neq 0$ . Тоді, віднімаючи з  $j$ -го рядка  $k$ -ий ( $j \neq k$ ), помножений на  $b_j/b_k$  отримаємо визначник, який дорівнює вихідному (початковому) (3.4), в якому коефіцієнти зворотних зв'язків  $p_i$  ( $i = \overline{1, n}$ ) входять в  $k$ -ий рядок. Розкриваючи його по цьому рядку і групуючи члени, при відповідних степенях  $\lambda$ , дійдемо остаточно до наступного виразу:

$$H(\lambda) = \lambda^n + \left( \sum_{i=1}^n c_{n-1,i} p_i + d_{n-1} \right) \lambda^{n-1} + \dots + \left( \sum_{i=1}^n c_{0,i} p_i + d_0 \right),$$

або

$$H(\lambda) = \lambda^n + (\bar{c}_{n-1}^T \bar{p} + d_{n-1}) \lambda^{n-1} + \dots + (\bar{c}_0^T \bar{p} + d_0). \quad (3.5)$$

Невідомі параметри  $c_{ji}$ ,  $d_j$  ( $j = \overline{0, n-1}$ ;  $i = \overline{1, n}$ ) визначаємо за  $n+1$  крок методом невизначених коефіцієнтів. Для цього на першому кроці, вважаючи  $p_i = 0$  ( $i = \overline{1, n}$ ) в визначнику (3.4) і розкриваючи його одним із відомих чисельних методів [7], знаходимо, що знайдені коефіцієнти при різних степенях  $\lambda$ , визначають невідомі коефіцієнти  $d_j$  ( $j = \overline{0, n-1}$ ) виразу (3.5) при відповідних степенях  $\lambda$ . На наступних етапах подальших  $n$  кроках, вважаючи по черзі, що один з коефіцієнтів  $p_i$  ( $i = \overline{1, n}$ ) дорівнює одиниці при інших нульових і розкриваючи визначник (3.15), отримаємо вираз для невідомого параметра  $c_{ji}$  при відповідній степені  $\lambda^j$  ( $j = \overline{0, n-1}$ ) в вигляді

$$c_{ji} = f_j - d_i, \quad (3.6)$$

де  $f_j$  – коефіцієнт при  $\lambda_j$  в  $i$ -му розкритому характеристичному визначнику.

Характеристичний поліном замкненої системи (3.4) з бажаними коренями  $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$  має вигляд:

$$F(\lambda) = \prod_{i=1}^n (\lambda - \lambda_i) = \sum_{j=0}^{n-1} l_j \lambda^j + \lambda^n . \quad (3.7)$$

В результаті для визначення коефіцієнтів зворотних зв'язків оптимального управління (3.3) отримаємо систему лінійних алгебраїчних рівнянь:

$$\text{col}(\bar{c}^T, \bar{c}^T, \dots, \bar{c}^T) \bar{p} = \bar{l} - \bar{d}, \quad (3.8)$$

де  $\bar{l} = (l_{n-1}, l_{n-2}, \dots, l_0), \bar{d} = (d_{n-1}, d_{n-2}, \dots, d_0)$ .

### 3.2.Робастна стабілізація програмного руху АРПА з параметричною невизначеністю

Даний розділ є розвитком робіт [27–31,39] і присвячений розробці модального підходу до забезпечення робастної стійкості програмного руху АРПА. Вирішена задача синтезу робастного лінійно-квадратичного регулятора з гарантованою динамікою перехідних процесів, динаміка якого описується лінійною стаціонарною моделлю. Проведемо процедуру синтезу згідно робіт автора [32,38].

Нехай керований і спостережений лінійний динамічний об'єкт з невизначеністю в параметрах описується в режимах стабілізації системою лінійних диференціальних рівнянь виду:

$$\dot{x}(t) = (A + \Lambda)x(t) + Bu(t), \quad (3.9)$$

де  $x$  –  $n$ -мірний вектор стану системи;  $u(t)$  –  $m$ -мірний вектор управління;  $A, B$  – матриці коефіцієнтів лінійної моделі хіміко-технологічного процесу і інтенсивності управління відповідно розмірністю  $(n \times n)$ ,  $(n \times m)$ ;  $\Lambda$  – невідома реальна матрична функція невизначеностей розмірності  $(n \times n)$ .

Необхідно визначити оптимальне управління  $\bar{u}(t)$ , яке переводить систему (3.9) із заданого початкового стану  $\bar{x}(t_0) = x_0$  в кінцеве  $\bar{x}(\infty) = 0$  і мінімізує квадратичний функціонал вигляду:

$$I_\sigma = \int_{t_0}^{t_k} [\bar{x}^T(t) Q \bar{x}(t) + \bar{u}^T(t) R \bar{u}(t)] dt, \quad (3.10)$$

де  $t_0 = 0; t_k = \infty$ , а  $Q$  і  $R$  – позитивно визначенні матриці розмірністю  $(n \times n)$  і



$(m \times m)$  відповідно.

У наведеній вище постановці завдання стабілізації лінійних динамічних систем з невизначеністю в параметрах відноситься до лінійно-квадратичним завдань оптимізації, яка зводиться до розв'язання нелінійного алгебраїчного рівняння Ріккати для визначення невідомих коефіцієнтів в законі оптимального керування, що представляє собою лінійну комбінацію змінних стану шуканої динамічної системи. В залежності від виду матриці невизначеності  $A$ , існує два основних підходу до вирішення поставленої задачі стабілізації, пов'язані з вирішенням рівняння Ріккати [33,34].

У першому випадку розглядається система виду

$$\dot{\bar{x}}(t) = [A + \Lambda(\mu)]\bar{x}(t) + B\bar{u}(t), \quad (3.11)$$

де  $\lim_{\mu \rightarrow 0} \Lambda(\mu) = 0$ , а  $\mu$  – параметричну невизначеність, що задовольняє нерівності

$$\|\Lambda(\mu)\| \leq I_A \|\mu\|. \quad (3.12)$$

Тоді, згідно [38], оптимальне управління можна представити у вигляді:

$$\bar{u}(t) = -(K + k)\bar{x}(t), \quad (3.13)$$

де  $K$  – матриця коефіцієнтів оптимального закону стабілізації системи (3.11) за відсутності матриці невизначеностей  $A$ ,  $k$  – матриця коефіцієнтів компенсації впливу невизначеностей на параметри системи (3.11), що визначається як:

$$k = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \varepsilon^{-1} B^T P(\varepsilon) = 0, \quad P(\varepsilon) \geq 0. \quad (3.14)$$

В формулі (3.14)  $P(\varepsilon)$  визначається з рівняння Лур'є-Ріккати

$$A^T P(\varepsilon) + P(\varepsilon) A - \varepsilon^{-1} B B^T P(\varepsilon) + I = 0. \quad (3.15)$$

Тут  $\lim_{\varepsilon \rightarrow 0} P(\varepsilon) = P$ , де  $P$  – рішення рівняння Ріккати для системи (3.11) при відсутності матриці невизначеностей  $A$ .

У другому випадку вважається, що матриця параметричних збурень належить деякої безлічі параметризації  $E$  при фіксованих матрицях  $Q$  і  $R$  і визначається як

$$E(A + \Lambda(\mu))_m = 1/2 B R^{-1} B^T P - 1/2 P^{-1} Q - mP, \quad (3.16)$$

де

$$m^T = \begin{bmatrix} 0 & m_1 & m_2 & m_3 \\ -m_1 & 0 & m_4 & m_5 \\ -m_2 & -m_4 & 0 & m_6 \\ -m_3 & -m_5 & -m_6 & 0 \end{bmatrix}, \quad (3.17)$$

кососиметрична матриця, елементи якої  $m_i$  визначаються за теоремою Харитонова [30,31] про робастність лінійних динамічних систем. Формула (3.17) здійснює канонізацію матриці  $A + \Lambda(\mu)$  і використовується в подальшому для визначення компенсаційного управління  $k$  в законі оптимальної стабілізації (3.13).

Позначивши матрицю  $A + \Lambda(\mu)$ , яка канонізована, через  $A^*$ , визначимо всю безліч компенсаційних регуляторів  $k$  згідно роботі [47,50] як

$$E(k)_{\beta\pi} = B^*(A^* - 1/2 BR^{-1}B^T PQ + (\beta)_k P + B^R \pi), \quad (3.18)$$

де  $B^*$  і  $A^*$  – матриці, які канонізовані;  $\pi$  – довільна матриця відповідної розмірності;  $\beta$  – кососиметрична матриця;  $B^R$  – правий дільник нуля максимального рангу [48,50].

В результаті, можна стверджувати, що синтезований таким чином регулятор (3.13) є робастним на множині параметризації і мінімізує функціонал (3.10). Розглянуті підходи до синтезу оптимального закону стабілізації лінійних динамічних систем з невизначеністю в параметрах досить складні в реалізації і не можуть забезпечити необхідні динамічні показники перехідних процесів лінійних динамічних систем в режимах стабілізації. Цих недоліків позбавлена запропонована нижче в даній роботі модальна робастна стабілізація.

З урахуванням (3.9) і (3.13) рівняння замкнутої оптимальної системи мають вигляд:

$$\dot{\bar{x}}(t) = [A + K]\bar{x}(t) + [\Lambda + k]\bar{x}(t). \quad (3.19)$$

Нехай задані обмеження на елементи матриці параметричної невизначеності  $\Lambda$ , пов'язані з похибкою ідентифікації, тобто

$$|\lambda_{ij}| \leq \Lambda_{ij}^0, \quad (3.20)$$

а також показники якості на перехідні процеси для змінних стану у вигляді:

$$|x_i(t)| \leq \sigma_i^0. \quad (3.21)$$

Потрібно синтезувати закон управління (3.13) при умовах (3.20) і забезпечити задані показники якості перехідних процесів (3.21) у системі стабілізації лінійних динамічних систем з параметричною невизначеністю.

Пропонована нижче модальна робастна стабілізація базується на принципі гарантованої динаміки [35,36]. В основу цього принципу покладена концепція допустимості, що використовує в якості оцінки первинні показники якості перехідних процесів, таких як час перехідного процесу, динамічна і статична точність.

Запишемо рівняння (3.30) в координатній формі

$$|\dot{x}_i(t)| = \sum_{j=1}^n (a_{ij} + K_{ij} + k_{ij} + \lambda_{ij}) x_j(t). \quad (3.22)$$

Згідно з роботою [49] умови (3.32) виконуються, якщо

$$\int_0^t x_i(\tau) \dot{x}_i(\tau) d\tau \leq \int_0^t \sigma_i(\tau) \sigma_i(\tau) d\tau, \quad i = 1, 2, \dots, n; \quad t \in [0, \infty]. \quad (3.23)$$

Підставляючи вираз (3.21) в (3.23) отримаємо:

$$\int_0^t \left[ \sum_{j=1}^n (a_{ij} + K_{ij} + k_{ij} + \lambda_{ij}) x_j(\tau) \right] x_i(\tau) d\tau \leq \int_0^t \sigma_i(\tau) \sigma_i(\tau) d\tau, \quad (3.24)$$

де  $i = 1, 2, \dots, n; \quad t \in [0, \infty]$ .

Задамо  $\sigma_i^0(t)$  в вигляді :

$$\sigma_i^0(t) = \sigma_i^0 e^{\alpha t}. \quad (3.25)$$

де  $\sigma_i^0$  вибираються як оцінки максимально можливих відхилень  $x_i(t)$  у початковий момент часу, а  $\alpha$  визначається з умови заданого ступеня загасання  $\beta_i$  перехідного процесу (рис.3.1) і однаково для всіх змінних стану, тобто

$$e^{\alpha t_k} \leq \beta_i, \quad (3.26)$$

де  $\alpha \leq 0, t_k$  – заданий час перехідного процесу.

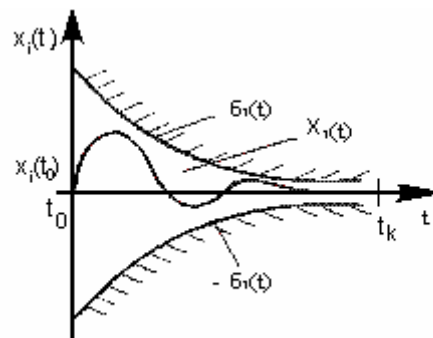


Рисунок.3.1.Межі допустимої області зміни  $i$ -го параметра

Зазначені динамічні показники перехідних процесів забезпечуються відповідним вибором спектру коренів замкнутої оптимальної системи.

З урахуванням (3.22), (3.23) рівняння (3.24) набуде вигляду:

$$\int_0^t [\sum_{j=1}^n (a_{ij} + K_{ij} + k_{ij} + \lambda_{ij}^0) \sigma_j^0] \sigma_i^0 e^{2\alpha\tau} d\tau \leq \int_0^t \alpha (\sigma_i^0)^2 d\tau, \quad (3.27)$$

де  $i = 1, 2, \dots, n$ ;  $t \in [0, \infty]$ .

Інтегруючи нерівність (3.48) на інтервалі  $t \in [0, \infty]$ , отримаємо систему лінійних алгебраїчних нерівностей :

$$2 [\sum_{j=1}^n (a_{ij} + K_{ij} + k_{ij} + \lambda_{ij}^0) \sigma_j^0] \sigma_i^0 e^{2\alpha\tau} \leq \sigma_i^0, i = 1, 2, \dots, n. \quad (3.28)$$

Звідси випливає, що множина значень  $k_{ij}$ , що задовольняє системі нерівностей (3.28), забезпечує робастність системи (3.30) до параметричних збурень на основі закону управління (3.13), отриманого наведеною вище процедурою модального синтезу. Одним з варіантів практичного визначення значень компенсаційних регуляторів  $k_{ij}$  є рішення системи нерівностей (3.28) на границях допустимих областей  $+\alpha\sigma_i^0$  і  $-\alpha\sigma_i^0$  за допомогою відомих чисельних методів[37].

### 3.3. Стабілізація програмного руху АРПА на основі МРС-підходу

Одним із сучасних формалізованих підходів до аналізу і синтезу систем керування, що базуються на математичних методах оптимізації, є теорія керування динамічними об'єктами з використанням прогнозуючих моделей – Model Predictive Control (MPC) [6]. Цей підхід для стабілізації програмного руху АРПА є ефективним, якщо не має можливості встановити структуру моделі АРПА.

Ідея оптимізації, що становить основу МРС-підходу, виникла в рамках двох незалежних, проте близьких по суті підходів. Перший з них, іменований Dynamics Matrix Control (DMC), розвивався зусиллями фахівців компанії Shell Oil в середині 60-х років [7], а другий – Model Algorithmic Control (MAC) – розроблений французькими інженерами хімічної промисловості в кінці 60-х [8]. На базі останнього підходу вперше був створений комерційний пакет програм IDCUM (Identification and Command), який певною мірою послужив прообразом

сучасної програмної підтримки методів управління з прогнозом. Пакет прикладних програм Model Predictive Control Toolbox (PC Tools)[9] являє собою набір інструментальних засобів дослідження і проектування алгоритмів управління в дискретних і неперервних системах на основі прогнозів динаміки їх поведінки. Сюди включені більше 50 спеціалізованих функцій для проектування, аналізу та моделювання динамічних систем, що використовують управління з передбаченням. Model Predictive Control Toolbox – це пакет для дослідження і проектування алгоритмів управління з прогнозом динаміки. Дозволяє створювати системи адаптивного управління для складних систем з одним або кількома входами (виходами) і різними обмеженнями. Пакет дозволяє реалізувати принцип управління, при якому вхідний вплив розраховується на кожному кроці на основі внутрішньої моделі об'єкта. Для оптимізації управління використовується квадратичне програмування. Розвиток ідей управління з прогнозуванням відбувається в напрямку використання нелінійних моделей, забезпечення стійкості за Ляпуновим контрольованих рухів, надання робастних властивостей замкнутій системі управління, застосування сучасних оптимізаційних методів у реальному масштабі часу та інше [10,11].

Практична реалізація МРС-підходу відповідає наступній схемі управління АРПА за принципом зворотного зв'язку (рис.1). Наведена схема може бути об'єднана з попереднім проведенням ідентифікації рівнянь моделі АРПА, використовуваної для виконання прогнозу:

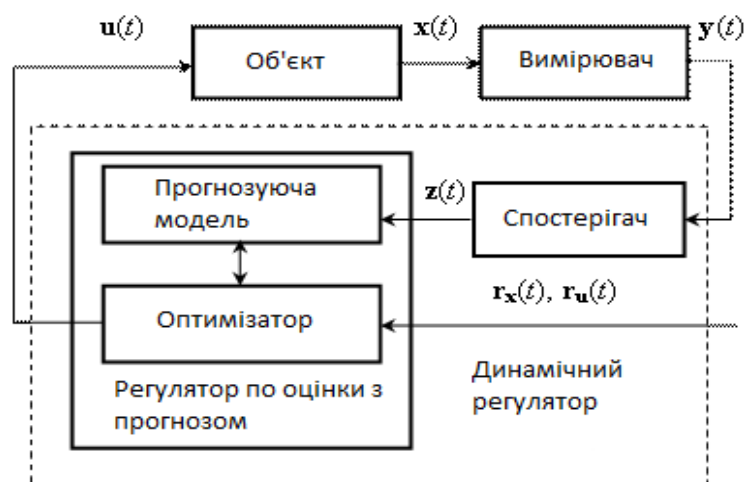


Рисунок. 3.2. Схема реалізації МРС-підходу

Згідно цієї схеми для АРПА реалізуються наступні етапи:

1. Розглядається деяка (відносно проста) математична модель об'єкта (АРПА), початковими умовами для якої служить його поточний стан. При заданому програмному управлінні виконується інтегрування рівнянь цієї моделі, що дає прогноз руху об'єкта на деякому кінцевому відрізку часу (горизонті прогнозу).
2. Виконується оптимізація програмного управління, метою якого є наближення регульованих змінних прогнозуючої моделі до відповідних задає сигналів на горизонті прогнозу. Оптимізація здійснюється з урахуванням всього комплексу обмежень, накладених на керуючі і регульовані змінні.
3. На кроці обчислень, який становить фіксовану малу частину горизонту прогнозу, реалізується знайдене оптимальне управління і здійснюється вимірювання (або відновлення по виміряним змінним) фактичного стану об'єкта на кінець кроку.
4. Горизонт прогнозу зсувається на крок вперед, і повторюються пункти 1 – 3 цієї послідовності дій. При цьому горизонт прогнозу визначається згідно зі швидкістю лінвмічних процесів.

### **3.4. Оптимальна стабілізація АРПА в режимі зависання**

Як вже зазначалося раніше проблем створення АРПА різного виду та призначення, у тому числі і що оснащуються підводними маніпуляторами (ПМ), а також їх систем управління (СУ) і навігації присвячені численні роботи. У цих працях показується, що багатоланкові ПМ, встановлені на АРПА, здатні виконувати складні маніпуляційні операції, успішно замінюючи водолазів в екстремальних умовах водного середовища.

У багатьох випадках підводні маніпуляційні операції потрібно виконувати швидко в режимі зависання АРПА над або поблизу об'єкта робіт, так як час підводних робіт часто обмежена, а їх вартість дуже висока. У цьому режимі роботи АРПА здатний з будь-просторовою орієнтацією підійти до об'єкта робіт

або досліджень, займаючи найбільш зручний для маніпулювання положення, не вносячи при цьому збурень у придонні шари води і не використовуючи додаткового обладнання та механічних пристроїв для жорсткої фіксації ПА до початку виконання технологічних операцій [46,47].

Однак у процесі переміщення ПМ з високою швидкістю у водному середовищі з боку цього маніпулятора на ПА починають з'являтися значні силові і моментні впливи, зумовлені не тільки інерційними і гравітаційними силами, а також силами, що визначаються взаємодією рухомих ланок ПМ з навколишнього в'язким середовищем. Крім того, на КАРПА впливають течії, хвилювання моря та ін. Все це призводить до незапланованого зміщення завислого в товщі води АРПА щодо його початкового положення і перешкоджає якісному виконанню багатьох маніпуляційних завдань. Виходячи зі сказаного, відзначається значний інтерес дослідників до вирішення проблеми створення високоточних систем стабілізації ПА в режимі їх зависання у водному середовищі при працюючих ПМ. Однак існуючі підходи і методи не дозволяють повною мірою вирішити цю важливу для практичного використання задачу [46,47].

Відомі системи утримання ПА в заданій точці простору використовують рекурентний алгоритм розв'язання оберненої задачі динаміки (ВЗД) ПМ для побудови розімкнутої системи компенсації рушіями цих ПА силових і моментних впливів, що з'являються при роботі ПМ і безперервно обчислюваних в реальному масштабі часу (РМВ) за допомогою цього алгоритму. Однак для розрахунку впливів ПМ на ПА в цих роботах використовується рекурентний алгоритм рішення ОЗД ПМ, призначений тільки для малих чисел Рейнольдса, тобто для малих швидкостей переміщення многозвенника, при яких ще діє принцип суперпозиції цих впливів на його ланки з боку в'язкого середовища. Але при швидких переміщеннях ПМ принцип суперпозиції порушується, і використовувані алгоритми вже не дозволяють коректно обчислювати шукані силові впливи і впливи моментів [46,47].

Крім того, виконати точний розрахунок силових і впливів моментів на цей АРПА з боку рухомого ПМ часто не представляється можливим через

наближеності визначення параметрів взаємодій ПМ з навколишнім водним середовищем і механічних параметрів самої конструкції ПМ. Це призводить до значного зниження точності стабілізації АРПА при використанні розімкнутих СУ.

Оскільки навіть ефективна система утримання АРПА в заданій точці простору в силу неминучих помилок навігаційних приладів, інерційності АРПА і динамічних запізнювань у роботі їх рушіїв неспроможна точно зафіксувати ПА в просторі, то навіть незначні зміщення АРПА від його вихідного положення неминуче спричинять за собою відхилення робочих органів (РО) ПМ від запропонованих просторових траєкторій. Це значно ускладнює виконання підводних маніпуляційних операцій [46,47].

Однак, якщо маса ПМ значно менше маси самого АРПА, то можна застосувати запропонований вище модальний синтез і для режиму зависання. При цьому проблема запізнювання вирішується методом, запропонованим автором у роботі [23].

### 3.5. Моделювання перехідних процесів в контурах стабілізації стану АРПА

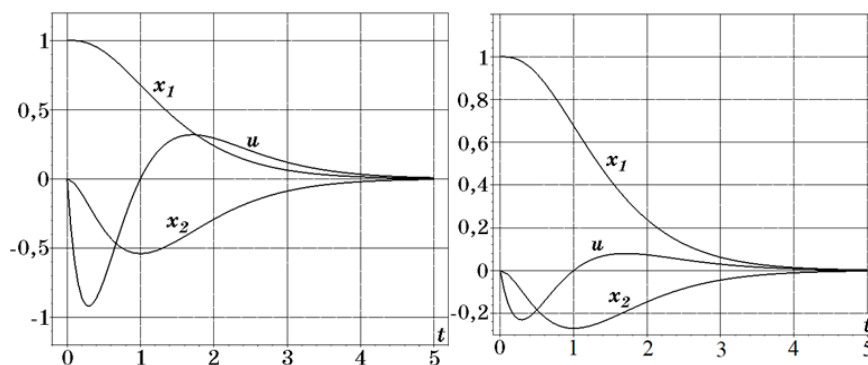
#### А. Моделювання режиму поступального руху АРПА

Розглядаються два випадки стабілізації куту тангажу та глибини занурення АРПА при різних початкових умовах.

В першому випадку модель описується наступним чином:

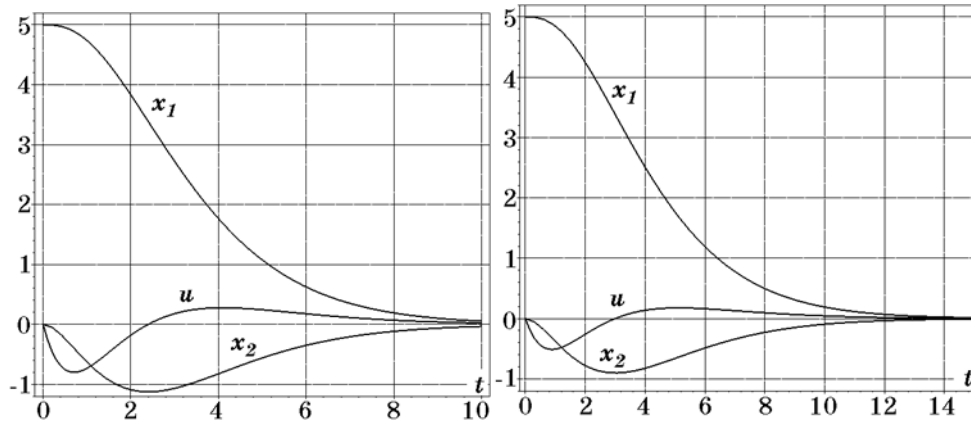
$$x_1 = v = \text{var } [^0]; x_2 = dv/dt = \text{var } [^0/c]; h = \text{const } [m]; V = \text{const}; \alpha = 0 [^0]$$

а) Початкові умови:  $x_{10} = I^0; x_{20} = 0$





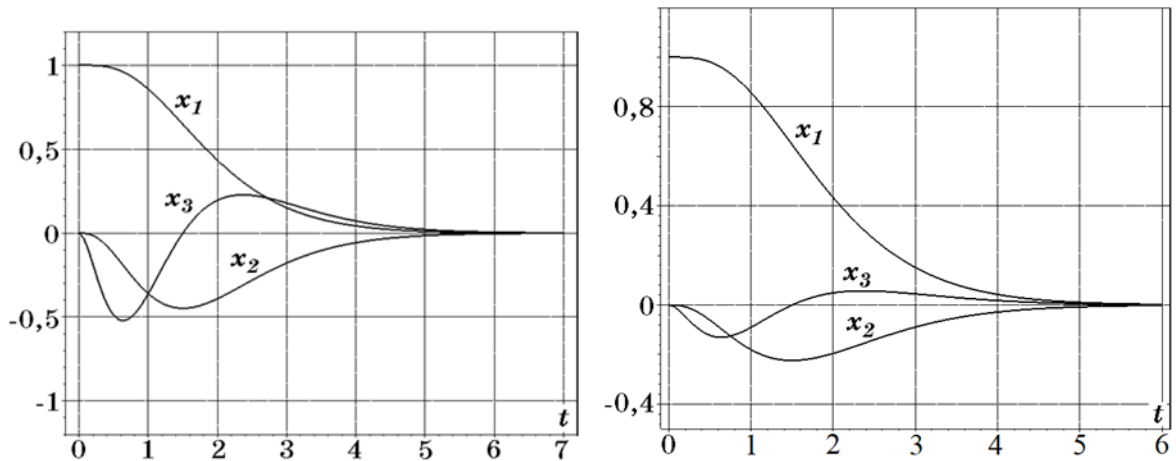
b) Початкові умови  $x_{10}=5^0$ ;  $x_{20}=0$ .



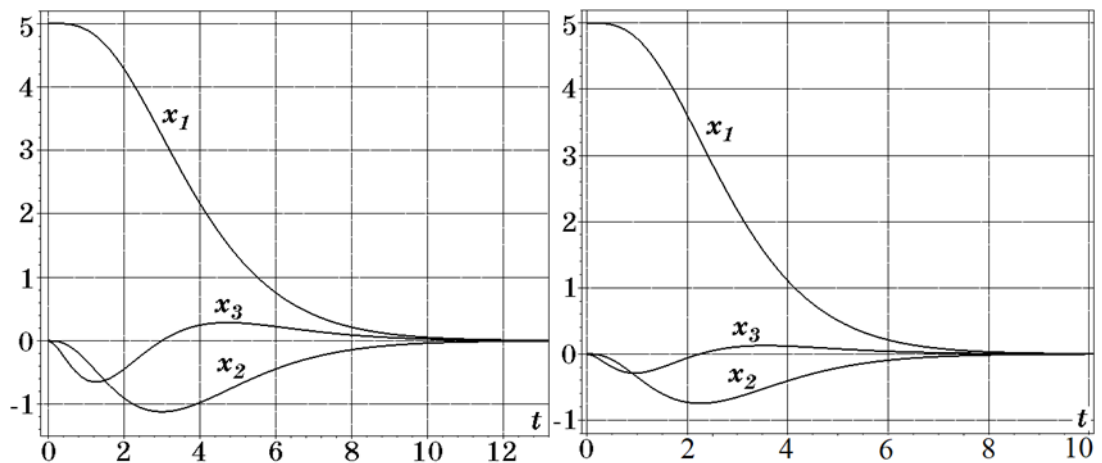
В другому випадку модель описується :

$$x_1=h=\text{var} [\text{м}]; x_2=dh/dt=\text{var} [\text{м/с}]; x_3=\omega_z=\text{var} [^0/\text{с}]; V=\text{const} [\text{м/с}]; \alpha=0 [^0]$$

a) Початкові умови:  $x_{10}=1\text{м}$ ;  $x_{20}=0$ ;  $x_{30}=0$ .



b) Початкові умови:  $x_{10}=5\text{м}$ ;  $x_{20}=0$ ;  $x_{30}=0$ .



З цих графіків випливає, що з точки зору модального синтезу, забезпечення заданих динамічних параметрів перехідних процесів стабілізації є більш ефективним. У першому випадку це стосується енергозберігаючого компонента при стабілізації

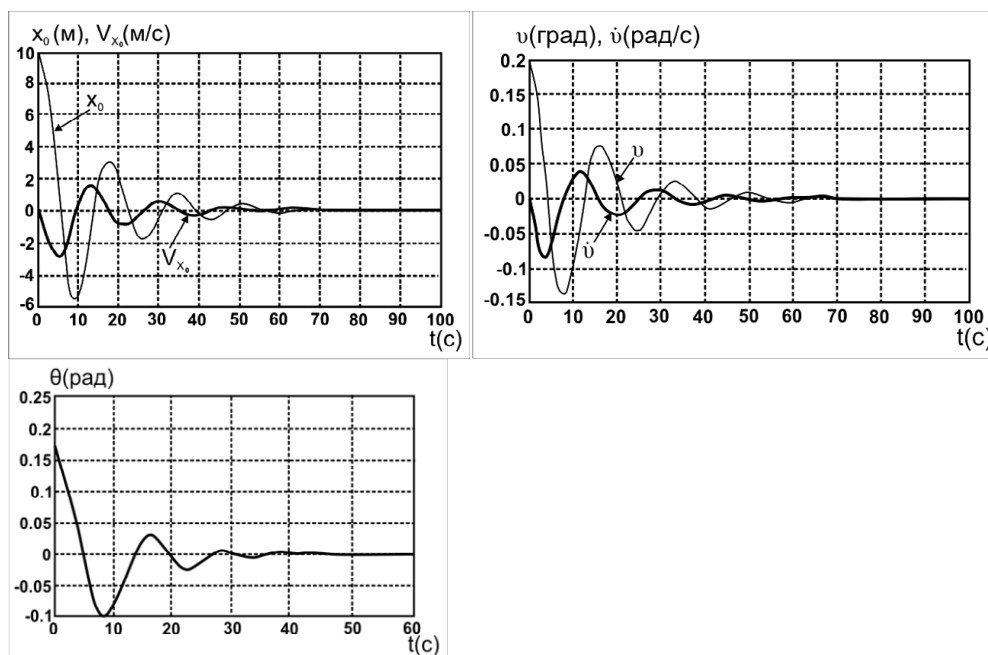
кута тангажа. У другому випадку, це стосується точності відстеження необхідних значень параметра стабілізації, тобто глибини руху АРПА. З допомогою запропонованого модального синтезу, заснованого на методі невизначених коефіцієнтів, можна забезпечити виконання таких динамічних показників якості перехідних процесів, як: час стабілізації, промах, загасання, ступінь коливань та ін. Це є основною перевагою даного методу перед методом АКОР, так як останній не має прямої залежності між коефіцієнтами критерію якості і коефіцієнтами зворотного зв'язку.

## В. Моделювання руху АРПА в режимі зависання

Розглядається стабілізація рівня глибини занурення АРПА, куту тангажу та куту рискання

Вихідні параметри моделі АРПА описується наступним чином:

$$v = \text{var} [rad]; dv/dt = \text{var} [rad/c]; x_o = \text{const} [m]; V_o = \text{const}; \theta = 0 [rad]$$



З цих графіків видно, що на відміну від стабілізації програмного поступального руху АРПА, процес стабілізації статичного положення АРПА займає більше часу і є більш коливальним. Це пояснюється тим, що рух АРПА з крейсерською швидкістю надає органам управління (рулям) значно більшу ефективність, ніж спеціалізовані малопотужні двигуни тяги (6 штук по числу

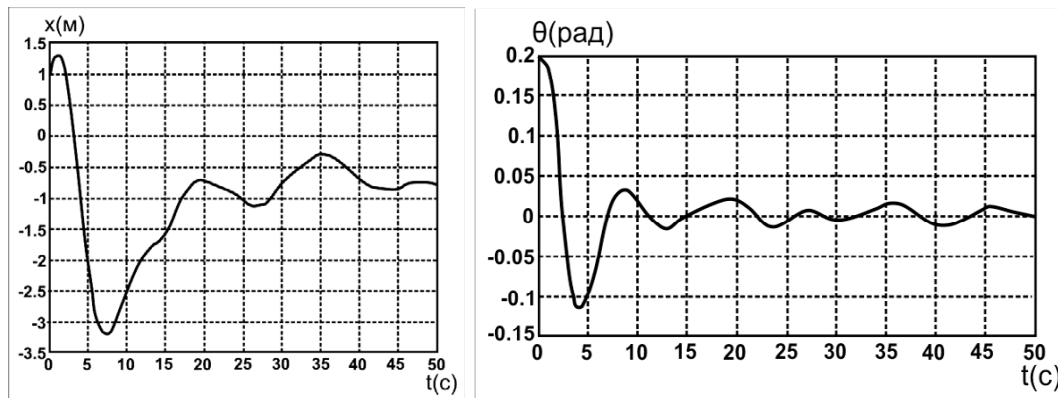
ступенів свободи) в статичному режимі стабілізації, тобто в цільовій точці зависання. Крім того сама модель АРПА в даному режимі є коливальною [46,47],

### С. Моделювання процесів стабілізації на основі МРС-підходу

Розглядається стабілізація рівня глибини занурення АРПА та куту рискання.

Вихідні параметри моделі АРПА описується наступним чином:

$$x_0 = \text{const} [m]; V_0 = \text{const}; \theta = \theta_0 [rad]$$



З цих графіків видно, що ефективність застосування МРС-підходу в значній мірі залежить від вдало обраної прогнозуючої моделі, точності оцінки її параметрів і обраного оптимального закону управління. В даному випадку, як і в наведених вище прикладах, як імітатора руху реального АРПА була використана лінійна динамічна модель другого порядку, як прогнозуючої моделі – аперіодична ланка першого порядку, а механізми ідентифікації і оптимізації взяті з робіт автора [32,36].

### Висновки до розділу

1. Розроблений оптимальний алгоритм стабілізації програмного руху стаціонарного АРПА на основі методу невизначених коефіцієнтів, який на відміну від існуючих забезпечує задані динамічні показники процесів стабілізації.

2. Розроблений робастний субоптимальний алгоритм стабілізації програмного руху АРПА с параметричною невизначеністю на основі принципу

динамічної гарантованості, що дозволяє враховувати похибки оцінки параметрів АРПА.

3. Запропонований МРС-підхід для стабілізації програмного руху АРПА, якщо динамічна модель АРПА невідома.

6. Отримані результати імітаційного моделювання підтверджують ефективність розроблених алгоритмів.

## РОЗДІЛ 4. МАРКЕТИНГОВИЙ АНАЛІЗ СТАРТАП-ПРОЕКТУ

Проведемо маркетинговий аналіз стартап проекту для визначення можливості його ринкового впровадження.

### 4.1.Опис ідеї проекту

Головна ідея даного стартап проекту полягає в розробці простої та надійної рейтингової системи для навчання студентів та керування навчальним процесом. Рейтингова система демонструє прогрес людей у навчанні з певної сфери знань. Важливим фактором даної системи є зручність у користуванні та належна її швидкодія. Завдяки всім цим особливостям дана система повинна витримувати значні навантаження та велику кількість користувачів, які одночасно користуються нею та дозволяти адміністраторам та іншим користувачам вести облік студентів та моніторинг їх результатів.

Опишемо детальніше саму ідею, основні напрямки застосування та вигоди користувачів, які вони можуть отримують(табл. 4.1).

Таблиця 4.1 Опис ідеї стартап проекту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Розробити рейтингову систему оцінювання студентів як підсистему для навчання студентів та керування навчальним процесом	Використання навчальними закладами та компаніями, які займаються навчанням людей для ведення результатів студентів, груп, викладачів. Виставлення оцінок	Приватні навчальні компанії та навчальні заклади отримують можливість здійснювати керування навчальним процесом за допомогою зручного інтерфейсу браузера та автоматизувати свою роботу за рахунок даної системи
	Використання студентами для навчання та перегляду корисних матеріалів	Студенти отримують можливість навчатися онлайн, мають постійний доступ до навчальних матеріалів та можуть переглядати свої результати навчання з того чи іншого предмету
	Використання роботодавцями для моніторингу студентів у певних спеціалізованих напрямках навчання	При відповідній популярності системи можна швидко проводити відбір у компанію за допомогою проходження тестових завдань

Наступним кроком оцінки ідеї є опис техніко-економічних переваг, які має даних додаток в порівнянні із вже існуючими рішеннями. В якості прямих

аналогів до нашого додатку оберемо систему для навчання студентів ITVDN та Main Academy. Визначимо сильні, слабкі та нейтральні характеристики нашого додатку в порівнянні з обраними конкурентами(табл. 4.2).

Таблиця 4.2 Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проекту

	Техніко– економічні характеристики ідеї	Продукція конкурентів			W (слабка сторона)	N (нейтрал ьна сторона)	S (сильна сторона)
		Мій проект	ITVDN	Main Academy			
	Сучасний дизайн	+	+	+		+	
	Зручність у користуванні	+	–	+		+	
	Швидкодія роботи	+	–	–			Має достатньо високу та конкурентноздат ну швидкодію роботи.
	Можливість використання методичних матеріалів	+	–	–		+	+
	Формування груп та уроків в системі	+	–	–			Створює можливість вчителю та адміністратору формувати завдання та таблиці оцінок
	Виставлення оцінок та формування рейтингу групи	+	–	–			Кожний студент отримує певну оцінку за кожний урок і може переглядати свій сумарний бал
	Відсутність нагромадження інформації на сторінці	+	–	–			+
	Масштабуванн я системи	+	+	+		+	

Визначений перелік слабких, сильних та нейтральних характеристик та властивостей ідеї потенційного товару є підґрунтям для формування його конкурентоспроможності. Із отриманих результатів можна зробити висновок, що даний стартап проект має переваги порівняно із аналогами.

#### 4.2. Технологічний аудит ідеї проекту

Зробимо перегляд технологій, які можна використати в розробці ідеї проекту(табл. 4.3)

Таблиця 4.3 Технології здійснення ідеї проекту

№	Ідея проекту	Технології її реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
1	Розробка рейтингової системи для навчання студентів та керування навчальним процесом і забезпечення її належної швидкодії	Використання мови програмування PHP	Наявна. Має добре продумані фреймворки.	Вільна
		Використання мови програмування JavaScript	Наявна. Має велику кількість готових рішень для вирішення різних проблем. Має декілька фреймворків для роботи з веб–додатками	Вільна
		Використання мови програмування C#	Наявна. Має один фреймворк для роботи з веб–додатками	Вільна
		Використання мови програмування Python	Наявна. Має один фреймворк для роботи з веб–додатками	Вільна
Обрана технологія реалізації проекту: JS(React).				

Проаналізувавши інформацію про технології, які можна використати для розробки веб–додатку рейтингової системи навчання студентів, можна зробити висновок, що для реалізації клієнтської частини найкраще підходить мова програмування JavaScript, оскільки вона найбільше підходить для реалізації ідеї

односторінкового веб–додатку з належною швидкістю. Дана мова та фреймворк React вже багато років існує на ринку мов програмування, тому має велику кількість готових рішень в області розробки веб-додатків.

#### 4.3. Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту

Опишемо ринкові можливості, які можна використати під час ринкового впровадження проекту, та ринкові загрози, які можуть перешкодити реалізації проекту.

Таблиця 4.4. Попередня характеристика потенційного ринку стартап проекту

№	Показники стану ринку	Характеристика
1	Кількість головних гравців, од	10
2	Загальний обсяг продаж, грн./ум.од	3000 в рік
3	Динаміка ринку	Зростає
4	Наявність обмежень	Відсутні
5	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	Відсутні
6	Середня норма рентабельності в галузі або по ринку, %	100%

Спираючись на проведені дослідження можна зробити висновок, що ринок є привабливим для входження та реалізації запланованої ідеї.

Визначимо потенційних клієнтів даного стартап проекту(табл. 4.5.)



Таблиця 4.5. Характеристика потенційних клієнтів стартап проекту

№	Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія(цільові сегменти ринку)	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів до товару
1	Наявність рейтингової системи для навчання студентів та автоматизація процесу навчання студентів веб-студії чи університету	Цільовою аудиторією є веб-студії та навчальні заклади, які проводять навчання студентів за різними напрямками та бажають автоматизувати процес та завжди мати під рукою всі потрібні дані про студентів та навчальний процес та можливі роботодавці, які мають певний специфічний процес відбору до своєї компанії такі як певна кількість тестових завдань.	Веб-студії та навчальні заклади в основному однаково зацікавлені у використанні даного веб-додатку, оскільки він дозволяє автоматизувати їх роботу	Головною вимогою є вміння користуватися сучасним веб-додатками та доступ до мережі інтернет

Провівши аналіз потенційних клієнтів стартап проекту, можна зробити однозначний висновок, що дана систему є особливо привабливою для веб-студій та навчальних закладів. Нею можуть зацікавитися також і великі університети та великі компанії, але в такому разі вона потребує доопрацювань та розширення базового функціоналу.

Здійснимо аналіз ринкового середовища. Спочатку визначимо основні фактори загроз, які можуть вплинути на продажі розробленої системи(табл. 4.6)

Таблиця 4.6 Фактори загроз

№	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
1	Погіршення швидкодії роботи веб-додатку при великій кількості даних	Система працює досить швидко та користувачу не доводиться витрачати багато часу для отримання певних даних. При наповненні системи даними та зберіганні в системі великої кількості даних можливе сповільнення роботи системи та потреба у її вдосконаленні	Звернення до розробників, які підтримують систему, перенесення даних, що не використовують в іншу спеціальні таблиці або їх видалення, якщо вони непотрібні
2	Вірогідність виникнення певних помилок в системі	Дана система має зв'язок між певними її компонентами. Тому для коректної роботи системи необхідно забезпечити систему відповідними вхідними даними.	Більше детальний опис документації, створення відео уроків, які демонструють як правильно користуватися системою

Розглянемо основні фактори можливостей, які можуть очікувати додаток при виході на ринок(табл. 4.7)

Таблиця 4.7 Фактори можливостей

№	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
1	Автоматизація роботи навчального закладу	За рахунок використання системи зменшується час потрібний на формування груп, класів, рейтингу студентів та виконання інших дій. Система дозволяє значно оптимізувати навчальний процес	Підвищення кваліфікації викладачів у користуванні даною системою
2	Виконання масової розсилки повідомлень	Система дозволяє здійснювати надсилання повідомлень конкретним користувачам чи групам користувачів	Підвищення кваліфікації адміністраторів системи у користуванні системою та запуску масової розсилки
3	Монетизація системи	Система дозволяє отримувати певні кошти за допомогою залучення компаній, які потребують проведення спеціалізованого відбору студентів	Надання відповідного функціоналу та доступів для моніторингу результатів рейтингової системи

На наступному кроці виконаємо ступеневий аналіз конкуренції(табл. 4.8)

Таблиця 4.8 Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

№	Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства( можливі дії компанії, щоб бути конкурентноспроможною)
1	Тип конкуренції: чиста конкуренція	Існує велика кількість конкурентів, які пропонують розробку системи даного типу	Реклама, підвищення швидкодії, якості та зручності у користуванні системою
2	Рівень конкурентної боротьби: національний	Рішення може використовуватися в навчальних закладах та веб-студіях на території України	Розширення функціональних можливостей системи та її доопрацювання.
3	Галузева ознака: внутрішньогалузевий	Конкуренція в сфері навчання студентів та автоматизації навчального процесу	Покращення якості та зручності в роботі системи та її функціональне розширення
4	Конкуренція за видами товарів: товарно-видова	Дана конкуренція – конкуренція між товарами одного виду	Впровадження функціональності, яка відсутня у додатках інших розробників. Спрощення в роботі додатку та забезпечення його належної якості.
5	Характер конкурентних переваг: цінова	Співвідношення вартості системи до її надійності та якості	Продаж системи за адекватні кошти та забезпечення належної підтримки
6	За інтенсивністю: марочна	Наявність унікального зразка, який відрізняє даних продукт від продуктів-замінників	Впровадження власної назви та власного знаку.

Таблиця 4.9 Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером

Складові аналізу	Прямі конкуренти в галузі	Потенційні конкуренти	Постачальники	Клієнти	Товарозамінники
	Веб студії, які мають велику популярність та ініціативи навчальних закладів	Інші дистриб'ютори	Відсутні	Веб–студії та навчальні заклади	Відсутні
Висновки	Необхідно надавати унікальний функціонал, забезпечити належну швидкодію та зручність у користуванні системою	При розширенні та доопрацюванні функціональності системи може стати конкурентом.	Відсутні	Кожний клієнт має певні побажання, які доцільно враховувати при розробці системи	Відсутні

Спираючись на проведені дослідження, можна зробити висновок, що конкуренція існує, проте кожний із відомих додатків має певні недоліки, тому для впровадження системи та забезпечення значних продаж, її потрібно розробити таким чином, щоб вона максимально задовольняла потреби користувачів, була зручною у користуванні та мала належну швидкодію.

Таблиця 4.10 Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

№	Фактор конкурентоспроможності	Обґрунтування
1	Автоматизація навчального процесу	За рахунок автоматизації навчального процесу відбувається зменшення часу необхідного для ведення обліку груп, студентів та інших даних певного навчального закладу
2	Належна швидкодія системи	Система працює швидше за своїх конкурентів та забезпечує швидке відображення потрібної користувачу інформації
3	Масштабування системи	Система може бути легко масштабована та витримувати значне навантаження та велику кількість користувачів, які одночасно нею користуються

Таблиця 4.11 Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін системи

№	Фактор конкуренто–спроможності	Бали 1–20	Рейтинг товарів–конкурентів у порівнянні з новою системою						
			–3	–2	–1	0	+1	+2	+3
1	Автоматизація навчального процесу	10			+				
2	Належна швидкодія системи	15		+					
3	Масштабування системи	10			+				

На основі отриманих даних, сформуємо SWOT – аналіз(матриці аналізу сильних Strength та слабких Weak сторін, загроз Troubles та можливостей Opportunities на основі виділених ринкових загроз та можливостей, а також сильних та слабких сторін). Перелік ринкових загроз та можливостей складається на основі аналізу факторів загроз та факторів можливостей маркетингового середовища. Ринкові загрози та можливості є наслідками впливу факторів. Цей метод можна вважати універсальним, бо він використовується для аналізу будь–яких об’єктів дослідження. Недоліком цього методу можна вважати той факт, що SWOT демонструє лише перелік певних факторів, не виявляючи в них основні та другорядні фактори або взаємного зв’язку.

Таблиця 4.12. SWOT–аналіз стартап–проекту

<p>Сильні сторони (S):</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• належна швидкодія</li> <li>• зручність користуванні</li> <li>• масштабованість</li> </ul>	<p>Слабкі сторони(W):</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• вартість розробки</li> <li>• вартість обслуговування</li> </ul>
<p>Можливості(O):</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• розширення функціоналу</li> <li>• покращення роботи системи</li> </ul>	<p>Загрози(T):</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• недостатнє фінансування</li> <li>• поява конкурентів</li> <li>• відсутність компаній, які будуть зацікавлені в користуванні веб–додатку</li> </ul>

На основі SWOT–аналізу розробимо альтернативи ринкової поведінки для забезпечення виведення стартап проекту на ринок та орієнтовний оптимальний час їх ринкової реалізації з огляду на потенційні проекти конкурентів, що можуть бути також виведені на ринок. Визначення альтернатив здійснюється з точки зору строків та ймовірності отримання оптимальних ресурсів.

Таблиця 4.13 Альтернативи ринкового впровадження стартап–проекту

№	Альтернатива (орієнтовний комплекс заходів) ринкової поведінки	Ймовірність отримання ресурсів	Строки реалізації
1	Безкоштовне надання певного функціоналу у користування споживачам на обмежений термін	Головний ресурс – люди, даний ресурс – наявний	1–3 місяці
2	Реклама	Залучення власних коштів для реклами товару	2–3 місяці
3	Написання статей та опис товару на відомих ресурсах	Головний ресурс – час, даний ресурс – наявний	2–3 тижні
4	Презентація товару на конференціях та інших ІТ заходах	Ресурс – час та гроші для участі, наявні	1 місяць

В результаті проведено аналізу, можна зробити висновок, що найбільш привабливою альтернативою для ринкового впровадження стартап проекту, є презентація товару на конференціях та інших ІТ заходах.

#### 4.4. Розроблення ринкової стратегії проекту

Розроблення ринкової стратегії першим кроком передбачає визначення стратегії охоплення ринку. Для цього необхідно визначитися з цільовою аудиторією системи, які є конкуренти на даному ринку та як швидко можна увійти на даний ринок, актуальність цього продукту (готовність споживачів прийняти продукт).

Таблиця 4.14. Вибір цільових груп потенційних споживачів

	Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів сприйняти продукт	Орієнтовний попит в межах цільової групи (сегменту)	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу у сегмент
	Програміст і. Вік: від 18 до 40. Місце проживання: не важливо. Сімейний стан: не важливий. Сфера зайнятості та рівень заробітної плати: ІТ сфера, від 30 тис. грн.	Даний продукт можна використовувати як засіб автоматизації роботи навчального закладу	1 ліцензія для навчального закладу чи веб-студії	Інтенсивність конкуренції в сегменті висока, оскільки існує великий попит систем даного типу	Сегмент дозволяє вийти на ринок та показати переваги даного продукту у контексті продуктів-аналогів
	Підприємства. Сфера зайнятості – навчання студентів.	Система дозволяє автоматизувати роботу навчального закладу або веб-студії та забезпечити хороший механізм для навчання студентів.	1 ліцензія для навчального закладу або веб-студії	Інтенсивність конкуренції в сегменті висока, оскільки існує велика кількість виробників схожих продуктів.	Сегмент дозволяє вийти на ринок та показати переваги даного продукту у контексті продуктів-аналогів
Які цільові групи обрано: ІТ сфера та навчальні заклади, у яких виникає необхідність в автоматизації навчального процесу та керуванням ним.					

Оскільки цільовою групою виступають навчальні заклади та розробники різних сфер, оберемо стратегію масового маркетингу.

Таблиця 4.15 Визначення базової стратегії розвитку

Обрана альтернатива розвитку проекту	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкурентоспроможні позиції відповідно до обраної альтернативи	Базова стратегія розвитку
Надання функціональності і що відсутня у товарів–замінників, підтримка клієнтів	Проведення реклами, освітлення унікальної функціональності через інтернет ресурси та інші канали, контакт напряду з споживачами; формування лояльності і прихильності споживачів	Зниження ступеню замінності товару; Прихильність клієнтів; Відмітні властивості товару; Відмітні характеристики товару;	Стратегія диференціації

Таблиця 4.16 Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

Чи є проект «першопрохідцем» на ринку	Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів?	Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента, які?	Стратегія конкурентної поведінки
Ні, оскільки є товари–аналоги, але дані товари не мають достатньої функціональності	Так, ціль компанії знайти нових споживачів та, частково, переманити існуючих у конкурентів задля задоволення потреб останніх	Компанія частково копіює характеристики товару конкурента, основна ціль компанії розробка нового унікального функціоналу, з підтримкою основного функціоналу конкурентів	Стратегія заняття конкурентної ніші

Таблиця 4.17 Визначення стратегії позиціонування

	Вимоги до товару цільової аудиторії	Базова стратегія розвитку	Ключові конкурентоспроможні позиції власного стартап–проекту	Вибір асоціацій, які мають сформувати комплексну позицію власного проекту
	Відмінні властивості товару	Стратегія диференціації	Унікальність функціоналу;	Надійність Актуальність Швидкодія
	Підтримка з боку розробника	Стратегія диференціації	Підтримка клієнту; Ліцензії; Модернізація системи	Клієнтоорієнтованість
	Відповідність	Стратегія диференціації	Підтримка та вдосконалення сучасних всім знайомих методів	Стабільність Зручність



	загальновживаним інтерфейсам			
--	------------------------------	--	--	--

Тобто, у якості базової стратегії розвитку було обрано стратегію диференціації та стратегію заняття конкурентної ніші, яка має базову стратегію конкурентної поведінки.

#### 4.5. Розроблення маркетингової програми стартап–проекту

Таблиця 4.18 Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

№	Потреба	Вигода, яку пропонує товар	Ключові переваги перед конкурентами (існуючі або такі, що потрібно створити)
1	Автоматизація роботи веб–студії або навчального закладу	Підвищення ефективності роботи веб–студії або навчального закладу за рахунок автоматизації навчального процесу	Існуючі конкуренти мають меншу швидкість системи та обмежений функціонал
2	Можливість моніторингу результатів навчання студентів	Студенти мають змогу контролювати свої результати та бачити результати виконання контрольних завдань	Даних систем рейтингового оцінювання на ринку не спостерігається

Здійснимо опис рівнів моделі товару

Таблиця 4.19 Опис трьох рівнів моделі товару

Рівні товару	Сутність та складові		
1. Товар за задумом	Забезпечення автоматизації роботи рейтингової системи веб–студії чи навчального закладу та надання роботодавцям долучатися до системи та проводити відбір до своєї компанії		
2. Товар у реальному виконанні	Властивості/характеристики	М/Нм	Вр/Тх/Тл/Е/Ор
	Зручність використання	–	Висока
	Забезпечення швидкої роботи та обробки даних	Час виконання запитів	
	Вартість	Грн.	0
	Якість: відповідність загальновживаним нормам		
	Пакування: ліцензія на використання системи		

	Марка: iRate
3. Товар із підкріпленням	До продажу: наявна повна документація, акції на придбання декількох ліцензій
	Після продажу: підтримка та доопрацювання продукту в разі необхідності та бажання замовника
Проект буде захищено від копіювання за рахунок реєстрації назви програми, отримання патенту на програмний код даного продукту та окремих алгоритмів обробки даних	

Таблиця 4.20 Визначення меж встановлення ціни

Рівень цін на товари–замінники	Рівень цін на товари–аналоги	Рівень доходів цільової групи споживачів	Верхня та нижня межі встановлення ціни на товар/послугу
інформація відсутня	приблизно 60 тис. грн..	від 50 тис. грн.	30–50 тис. грн

Таблиця 4.21 Формування системи збуту

Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів	Функції збуту, які має виконувати постачальник товару	Глибина каналу збуту	Оптимальна система збуту
Отримання продукту	Ліцензії	Нульовий та/або однорівневий	Традиційна

Таблиця 4.22 Концепція маркетингових комунікацій

	Специфіка поведінки цільових клієнтів	Канали комунікацій, якими користуються цільові клієнти	Ключові позиції, обрані для позиціонування	Завдання рекламного повідомлення	Концепція рекламного звернення
	Отримання продукту / функціональності	Електронна пошта, телефон, факс, електронна форма на сайті	Унікальні властивості товару	Привернути увагу клієнтів, освітити унікальність функціональності	Творча та класична
	Отримання підтримки від компанії		Якісна підтримка	Дати зрозуміти що клієнт може розраховувати на підтримку зі сторони розробника	

В результаті було створено ринкову програму, що включає в себе визначення ключових переваг концепції потенційного товару, опис моделі

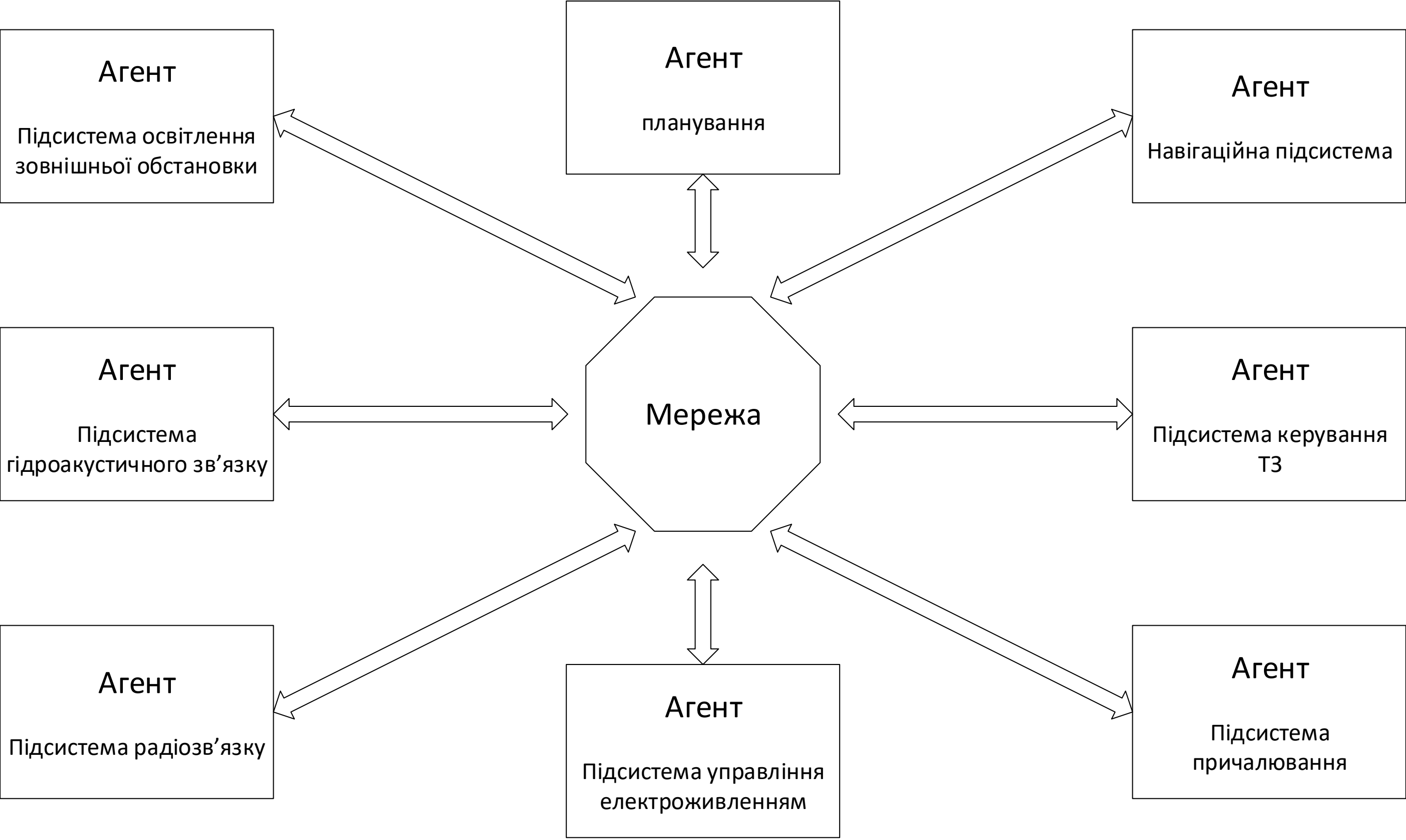
товару, визначення меж встановлення ціни, формування системи збуту та концепцію маркетингових комунікацій.

### **Висновки до розділу**

В даному розділі було описано ідею проекту, здійснено аналіз потенційних техніко економічних переваг ідеї, а саме визначено сильні, нейтральні та слабкі сторони даної ідеї. Проведено аудит описаної ідеї та визначення її технологічної здійсненності. На основі отриманих результатів було зроблено висновок, що дана ідея є здійсненною. Виконано попередню оцінку потенційного ринку стартап проекту, визначено потенційних клієнтів даного продукту, визначено основні фактори загроз та можливостей. Проведено ступеневий аналіз конкуренції на ринку, обґрунтовано фактори конкурентоспроможності та виконано порівняльний аналіз сильних та слабких сторін продукту та конкурентів. Проведено SWOT–аналіз та альтернативні шляхи впровадження даного продукту. На основі отриманих результатів можна зробити висновок, що даний проект може бути впроваджений та зайняти свою нішу.

## ДОДАТКИ

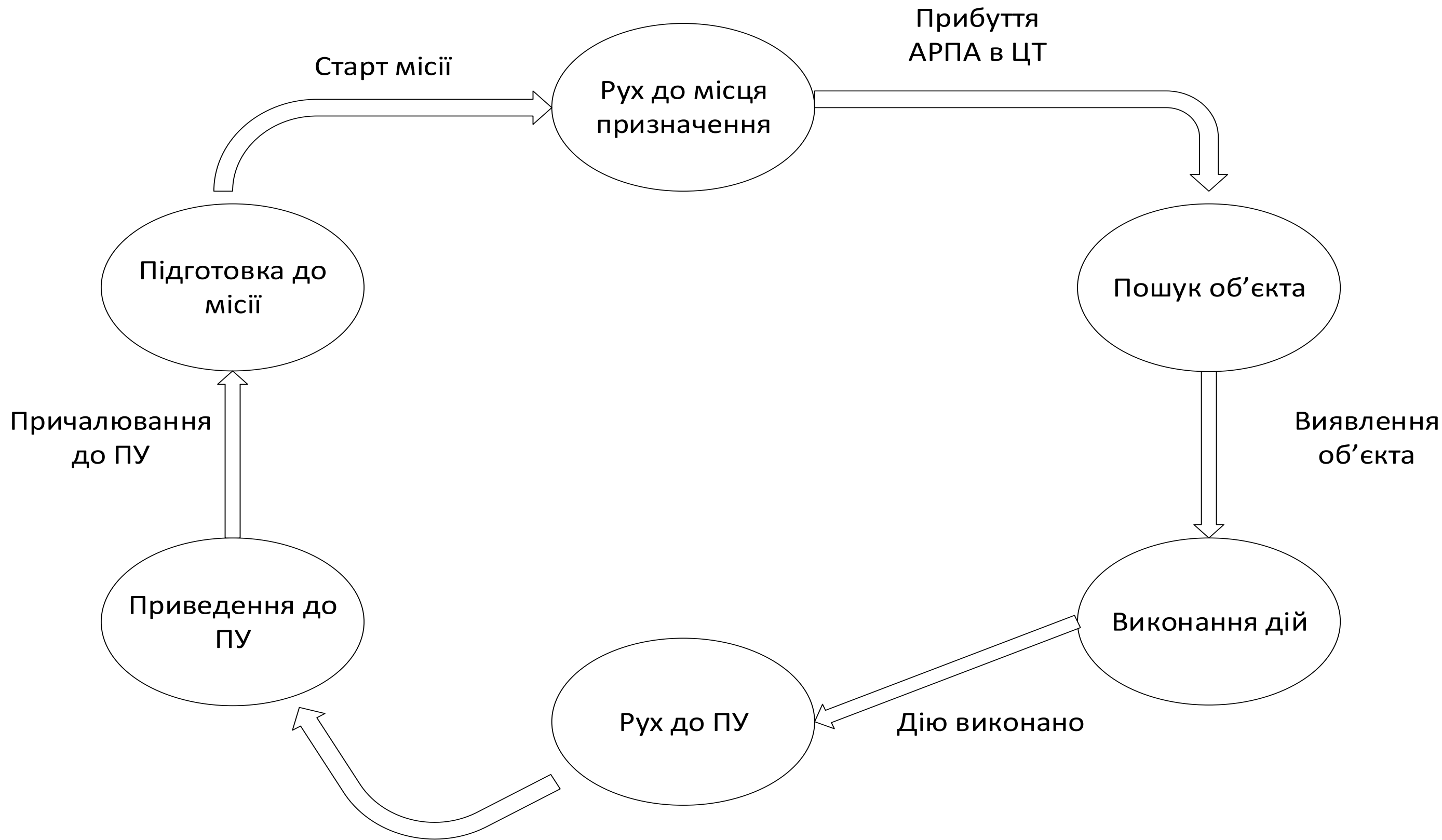
## Додаток А «Графічні матеріали»



Демонстраційний плакат «Структура ІСУ АРПА»

Виконав: Стенін О.С. \_\_\_\_\_

Перевірив:  
к.т.н.,доц. Пасько В.П. \_\_\_\_\_

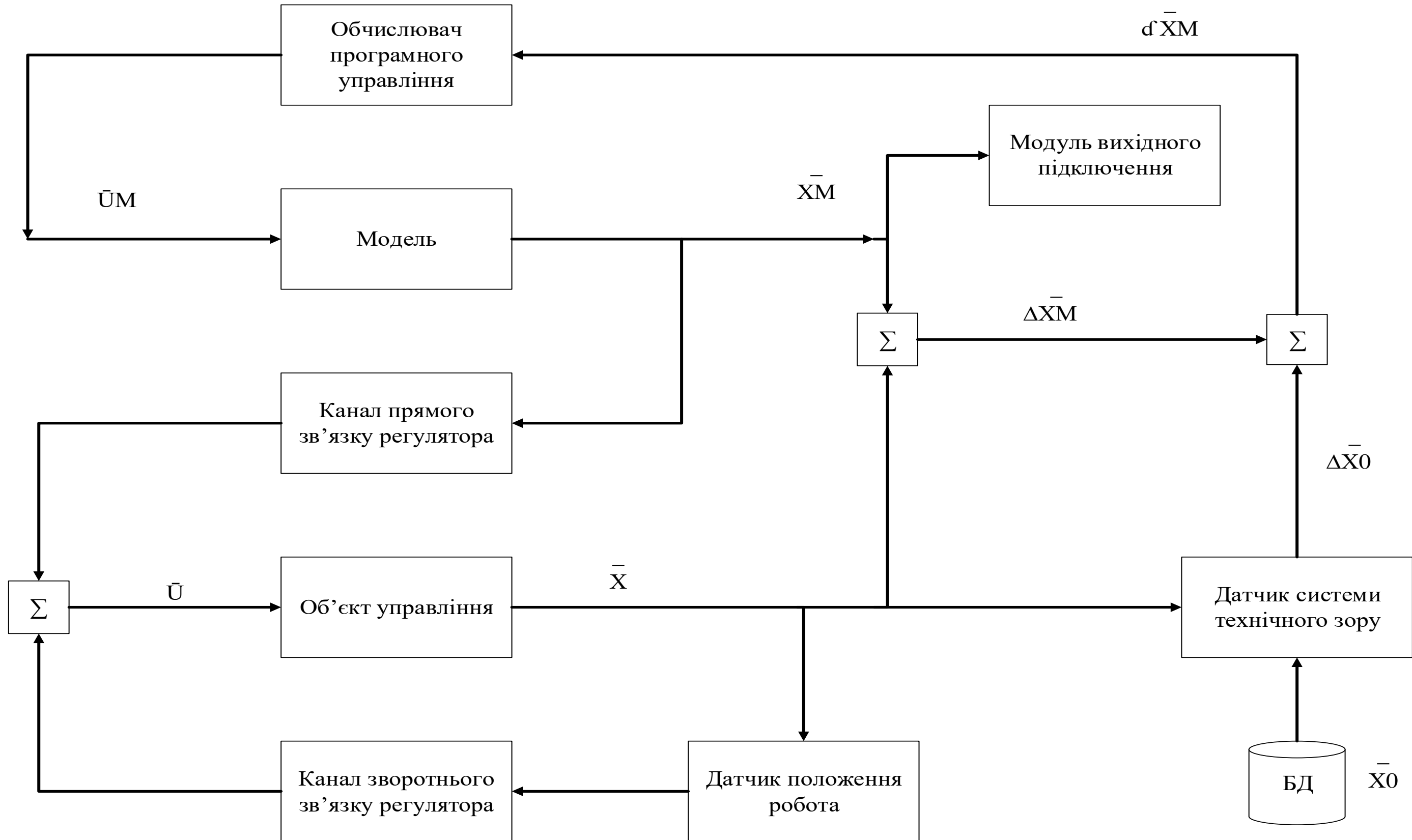


Демонстраційний плакат «Етапи виконання місій  
(ЦТ-цільова точка;ПУ- причальний пристрій)»

Виконав: Стенін О.С. \_\_\_\_\_

Перевірив:

к.т.н.,доц. Пасько В.П. \_\_\_\_\_



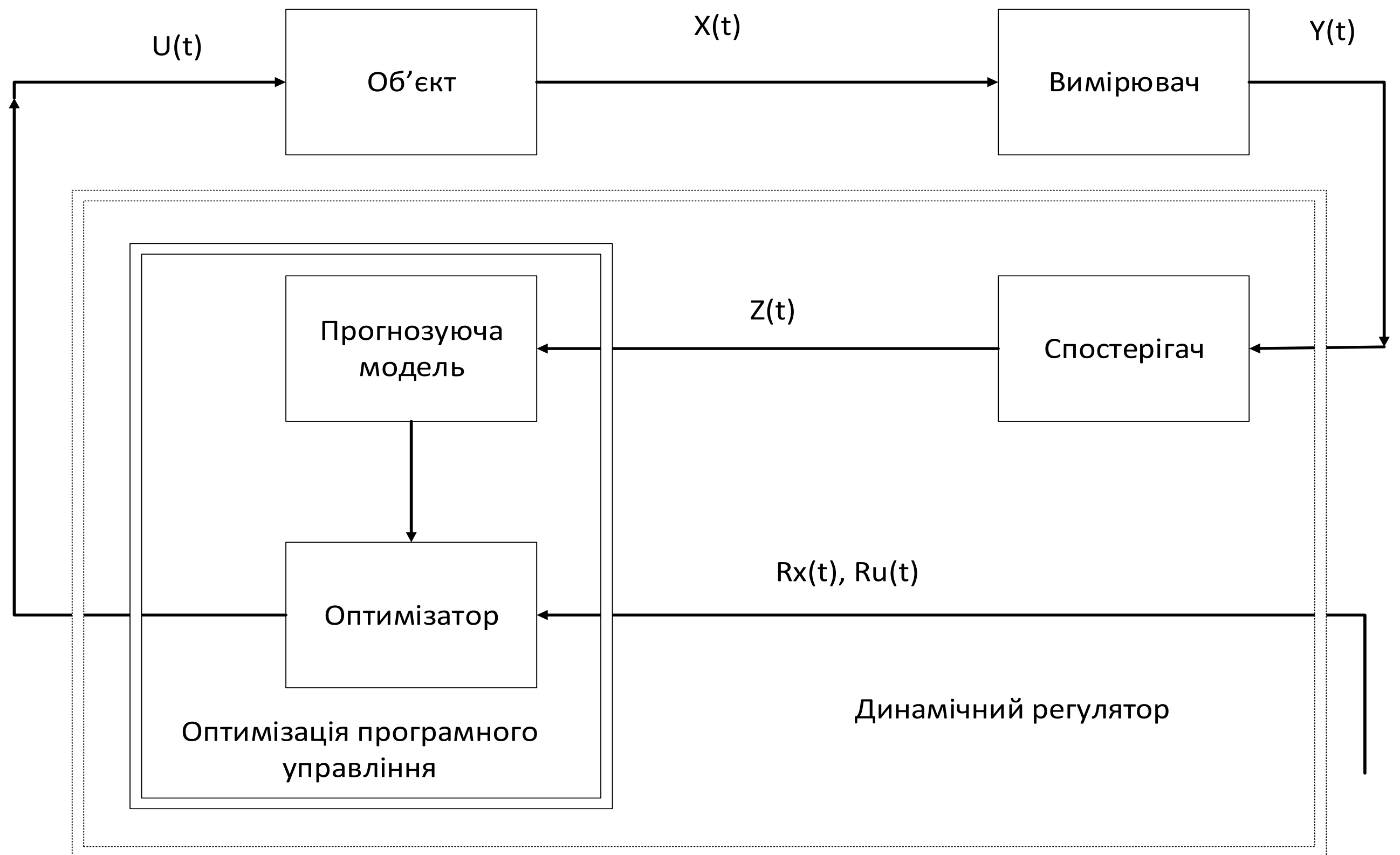
Демонстраційний плакат «Структура системи автоматичного управління обходу АРПА одиночної перешкоди»

Виконав: Стенін О.С. \_\_\_\_\_

Перевірив:

к.т.н.,доц. Пасько В.П. \_\_\_\_\_



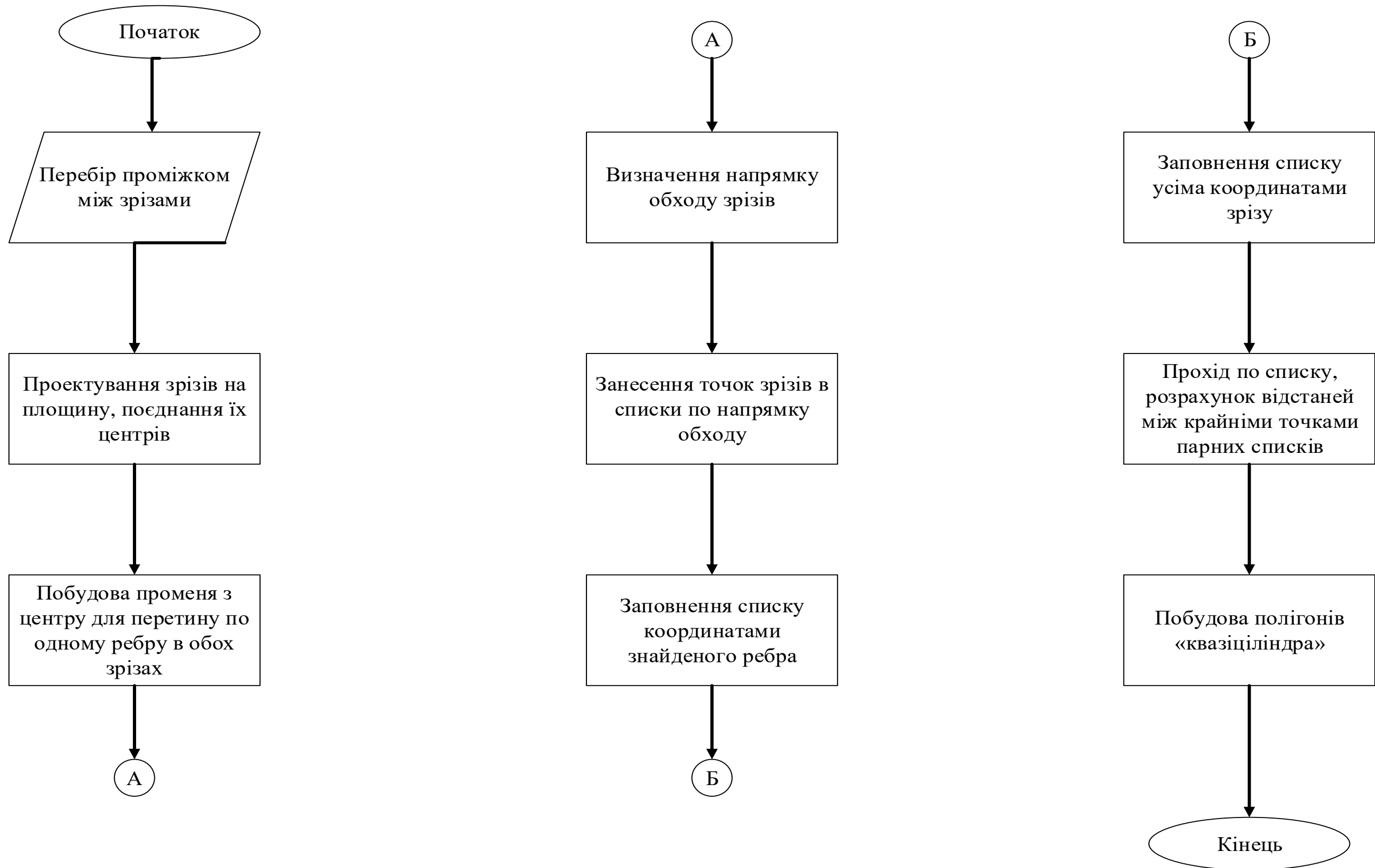


Демонстраційний плакат «Схема реалізації МРС-підходу»

Виконав: Стенін О.С. \_\_\_\_\_

Перевірив:

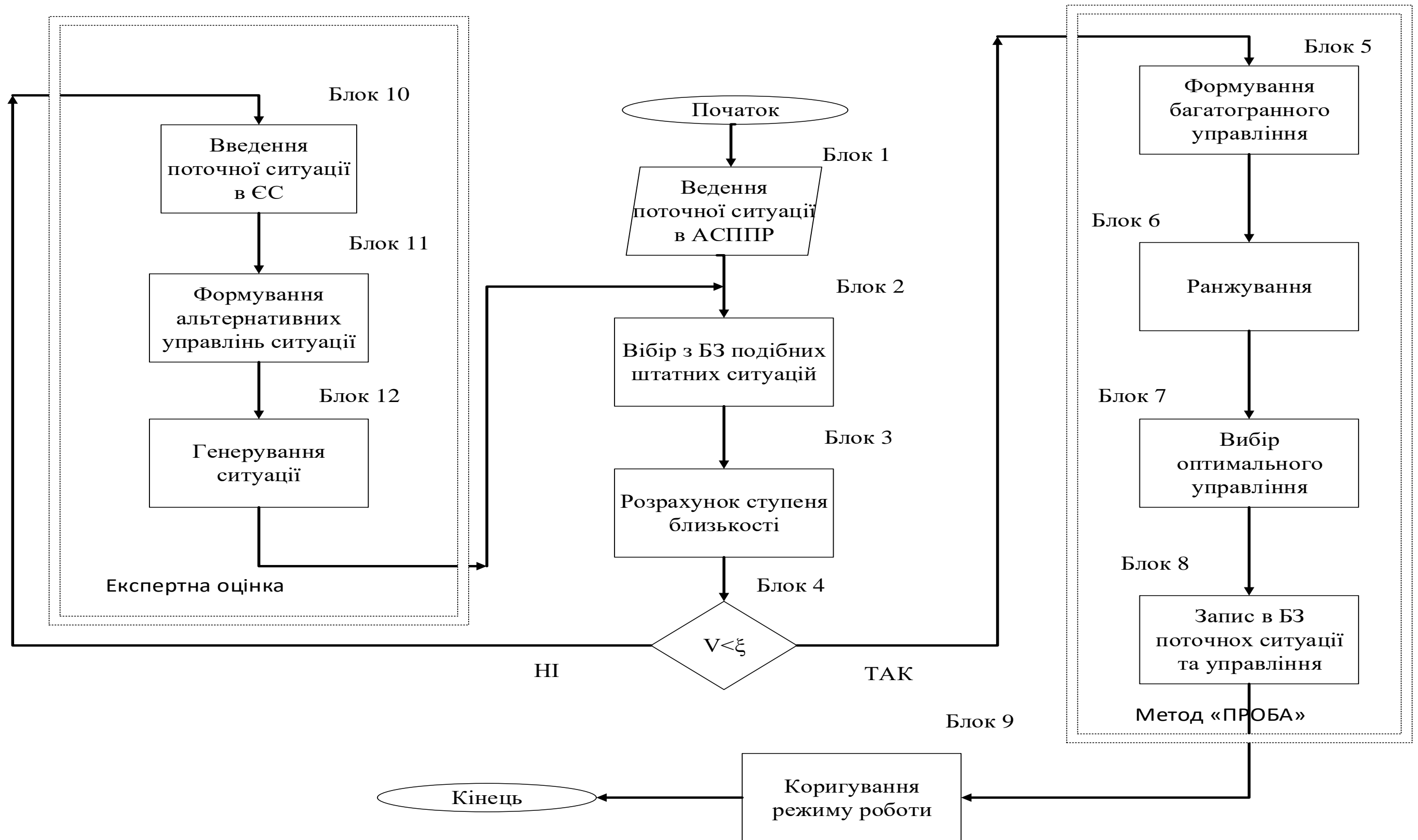
к.т.н.,доц. Пасько В.П. \_\_\_\_\_



Демонстраційний плакат «Блок-схема алгоритму побудови моделі «квазіциліндра»»

Виконав: Стенін О.С. \_\_\_\_\_

Перевірив:  
к.т.н.,доц. Пасько В.П. \_\_\_\_\_



Демонстраційний плакат «Алгоритм нечіткого ситуаційного управління АРПА»

Виконав: Стенін О.С. \_\_\_\_\_

Перевірив: \_\_\_\_\_

к.т.н.,доц. Пасько В.П. \_\_\_\_\_

Додаток Б «Результат перевірки на співпадіння»

Submission author:  
**Лісовиченко Олег Іванович**

Check ID:  
**1000682978**

Check date:  
**29.11.2019 15:01:07 GMT+0**

Check type:  
**Doc vs Internet + Library**

Report date:  
**02.12.2019 09:16:11 GMT+0**

User ID:  
**76913**

---

File name: **Стенін О.С. ІК-82**

File ID: **1000694900** Page count: **55** Word count: **12972** Character count: **95071** File size: **254.14 KB**

---

## 16.1% Matches

---

Highest match: **9.28%** with library source. File ID: **5962064**

5.7% Internet Matches	115	..... Page 57
-----------------------	-----	---------------

11.7% Library matches	48	..... Page 58
-----------------------	----	---------------

## 0% Quotes

---

No quotes found
-----------------

## 0% Exclusions

---

No exclusions found
---------------------

## Replacement

Character replacement	112
-----------------------	-----

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Проаналізовано сучасний стан побудови АРПА, він показав, що зростаючі складності вирішуваних завдань зумовлюють необхідність використання сучасних підходів до проектування ІСУ АРПА з використанням ІСППР ситуаційного типу. Проведено аналіз основних завдань АРПА, що показав, що рух в цільову точку і повернення на базу є практично основним елементом у різних місіях АРПА і потребує дуже складної взаємодії агентів підсистем АРПА, в тому числі в умовах виникнення нештатних ситуацій, зумовлених як зовнішніми (непередбачені перешкоди), так і внутрішніми (несправності апаратної частини, збої програмного забезпечення, вичерпання запасу електроенергії) причинами.

Було розроблені детермінований на основі методу динамічного програмування і ситуаційний на основі апарату марковських процесів алгоритми планування оптимального маршруту АРПА для різних критеріїв якості і в різних умовах функціонування.

Розроблені алгоритми управління АРПА, які можуть, крім штатних режимів, працювати і при невизначеності рельєфу підводних перешкод різного типу.

Розроблений оптимальний алгоритм стабілізації програмного руху стаціонарного АРПА на основі методу невизначених коефіцієнтів, який на відміну від існуючих забезпечує задані динамічні показники процесів стабілізації.

Розроблений робастний субоптимальний алгоритм стабілізації програмного руху АРПА з параметричною невизначеністю на основі принципу динамічної гарантованості, що дозволяє враховувати похибки оцінки параметрів АРПА.

Запропонований МРС– підхід для стабілізації програмного руху АРПА, якщо динамічна модель АРПА невідома.

Отримані результати імітаційного моделювання підтверджують ефективність розроблених алгоритмів

## Література

1. 1.Агеев М.Д., Касаткин Б.А., Рылов Н.И. и др. Автоматические подводные аппараты.– Л.: Судостроение, 1981. – 223 с.
2. Автономные необитаемые подводные аппараты / под общ. ред. академика М.Д. Агеева. – Владивосток: Дальнаука, 2000. – 272 с.
3. Баженов Ю.А., Гаврилов В.М., Жуков Ю.И. и др. Самоходные необитаемые подводные аппараты. – Л.: Судостроение, 1986. – 277 с.
4. Дмитриев А.Н. Проектирование подводных аппаратов. – Л.: Судостроение, 1978. –236 с.
5. Илларионов Г.Ю., Карпачев А.А. Исследовательское проектирование необитаемых подводных аппаратов. – Владивосток: Дальнаука, 1998. – 270 с.
6. Обзор дистанционно–управляемых подводных систем и аппаратов многоцелевого назначения // Журнал Underwater. – 2006, май–июнь.
7. Kraider D.R. UUVs for underwater Worn–Innovation or Higt tech Toy? // Sea Technology. – 1977. – Vol. 38, № 2. – pp. 51–61.
8. Городецкий В.И., Грушинский М.С., Хабалов А.В. Многоагентные системы (обзор) //Новости искусственного интеллекта. – 1998. – № 2. – сс. 64–116.
9. Ржевский Г.А., Скобелев П.О. Как управлять сложными системами? Мультиагентные технологии для создания интеллектуальных систем управления предприятиями. – Самара: Офорт, 2015. – 290 с.
- 10.Мартынова Л. А., Машошин А. И., Пашкевич И. В., Соколов А. И. Система управления — наиболее сложная часть автономных необитаемых подводных аппаратов // Морская радиоэлектроника. 2015. № 4(54). С. 23–32.
11. Габасов Р.А., Кириллова Ф.М. Основы динамического программирования. – Мн.: Изд–во БГУ, 1975. – 262 с.
- 12.Силов Б.В. Принятие стратегических решений в нечеткой обстановке. М.: ИНПРО–РЕС, 1995. – 228 с.

- 13.Поспелов Д.А. Ситуационное управление: Теория и практика. – М.: Наука.– Гл. ред. физ.–мат. лит., 1986. – 288 с
- 14.Прикладные нечеткие системы/ Под ред. Тэрано Т., Асаи К., Сугэно. М.: Мир, 1993. – 368 с.
- 15.Мелихов А.Н., Берштейн Л.С., Коровин С.Я. Ситуационные советующие системы с нечеткой логикой. М.: Наука, 1990. – 272 с.
- 16.Борисов А.Н., Алексеев А.В. Меркурьев Г.В. Обработка нечеткой информации в системах принятия решений. М.: Радио и связь, 1989. – 304 с.
- 17.Федунов Б.Е. Механизмы вывода в базе знаний бортовых оперативно советующих экспертных систем. // Изв. РАН. ТиСУ. – №4 – 2002. – С. 42–52.
- 18.А.Н.Наумов, А.М.Вендров, В.К.Иванови др. Системы управления базами данных и знаний.М.: Финансы и статистика, 1991.–352 с.
- 19.Стенин А.А., Ткач М.М., Пасько В.П., Губский А.Н.. Автоматизация процесса принятия инновационных решений в социотехнических системах– Проблемы информационных технологий. – Херсон, ХНТУ,2016. №19. – С. 51–
- 20.Стенин А.А, Пасько В.П., Лемешко В.А., Русакова А.В. Ситуационное управление городским транспортом с интеллектуальной поддержкой диспетчерских решений Сб–к «Инфокоммуникационные системы и технологии»– Киев, Изд–во «Інжинірінг», №2(2),2018. – Р.18 – 23.
- 21.Стенин А.А., Пасько В.П., Шитикова И.Г., Лемешко В.А. Построение предметно–ориентированных ИСППР ситуационного типа. Вчені записки Таврійського національного університету ім. В.І. Вернадського: Серія: Технічні науки, Том 29 (68), № 1, 2018, – Частина 2. – С.25–31.
- 22.Агеев М.Д., Киселев Л.В., Матвиенко Ю.В. и др. Автономные подводные роботы. Системы и технологии / Под общей ред. М.Д.Агеева. М.: Наука, 2005. 398с.



23. Михалев А.И., Солдатов М.А., Стенин А.С. Модальный синтез оптимальных законов стабилизации объектов управления с транспортным запаздыванием // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. – Выпуск 4 (111). – Дніпро, 2017. – С.30 – 38.
24. А.И. Михалев, А.А. Стенин, Ю.А. Тимошин, Е.Ю. Мелкумян, О.М. Польшакова Движение интеллектуального шагающего робота в условиях неопределенности рельефа местности–Системные технологии – Днепр–ск: НМетАУ, ИВК «Системні технології», №5(112), 2018. – сс.
25. А.А.Стенин, О.И.Лисовиченко, М.М.Ткач, В.П.Пасько Модальный синтез оптимальных законов стабилизации линейных стационарных систем Bulgarian Journal for Engineering Design, issue. Mechanical Engineering Faculty, Technical University–Sofia. № 30, 2016.pp.11–16.
26. Атанс М., Фалб П. Оптимальное управление. М.: Машиностроение, 1968. – 764 с.
27. Буков В. Н. Вложение систем. Аналитический подход к анализу и синтезу матричных систем.– Калуга: Изд–во науч. лит. Н. Ф. Бочкаревой, 2006. 720 с.
28. Поляк Б. Т., Щербаков П. С. Робастная устойчивость и управление. – М.: Наука, 2002. – 303 с.
29. Цыкунов А. М. Алгоритмы робастного управления с компенсацией ограниченных возмущений // Автоматика и телемеханика. – 2007. – № 7. – сс. 103–115.
30. Цыкунов А. М. Алгоритмы робастного управления линейными динамическими объектами по выходу // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2008. – № 8. – сс. 7–12.
31. А.А.Стенин, В.П.Пасько, Л.В.Сиренко. Робастная стабилизация линейных динамических систем с параметрической неопределенностью (материалы 13-й международной научно–практической конференции «Trends of modern science–2017», 30.05–7.06.2017, pp.62–69).

- 32.Стенін О.А., Пасько В.П., В.М.Ігнатенко, О.С.Стенін. Оптимальне управління автономним роботизованим підводним апаратом на основі прогнозуючих моделей // Адаптивні системи автоматичного управління. – 2018. – №2(33) ().–С
- 33.Буков В.Н. Аналитический синтез робастных регуляторов на основе параметризации уравнения Лурье–Риккати / В.Н. Буков, Н.И. Сельвесюк // Автоматика и телемеханика. – 2007. – №2. – сс. 6–16.
- 34.Буков В.Н. Решение матричных уравнений методом канонизации / В.Н. Буков, В.Н. Рябченко, В.В. Косьянчук, Е.Ю. Зыбин // Вестник Киевского ун-та : Сер. Физ.–мат. науки. – К.: Изд-во Киевского нац. ун-та, 2002. – Вып. 1. –сс. 19–28.
- 35.Оморев Т.Т. Принцип гарантированной динамики в теории систем управления. Кн.1.Бишкек. –Илим. 2001.–150с.
- 36.О.І.Михальов, О.А.Стенін, М.О.Солдатова, О.С.Стенін Модальна робастна стабілізація об'єктів керування з параметричною невизначеністю// Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник.– Вип.–№ Дніпро.–2018.С.
- 37.Фельдман Л.П., Петренко А.І., Дмитрієва О.А. Чисельні методи в інформатиці. К.: Видавнича група BHV, 2006. – 480 с.
- 38.О.І.Михальов, О.А.Стенін, М.О.Солдатова, О.С.Стенін Модальна робастна стабілізація об'єктів керування з параметричною невизначеністю(матеріали міжнародній науково–технічній конференції «Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні» с.), 28–30 березня 2018 р. м.Дніпро
- 39.Atassi A. N., Khalil H. K. Separation principle for the stabilization of class of nonlinear systems // IEEE Trans. Automat. Control. – 1999. – Vol. 44, N 9. – pp. 1672–1687
- 40.Camacho E., Bordons, C., Model Predictive Control, Springer–Verlag, 2004, 405p.

41. Dougherty, D., Cooper D. A practical multiple model adaptive strategy for multivariable model predictive control. Control engineering practice. Elsevier Science Publishing Company. Vol.11, №6, 2003, pp.649–664.
42. Holkar L., Waghmare M. Overview of Model Predictive. Control International Journal of Control and Automation International Journal of Control and Automation Vol. 3 No. 4, December, 2010 Vol. 3 No. 4, December, 2010 December, 2010, pp.47–63
43. Åkesson J. MPC tools 1.0 – Reference Manual Department of Automatic Control. Lund Institute of Technology, January, 2006.–30 p.
44. Camacho E., Bordons C. Model predictive control. London: Springer–Verlag, 2004. 405 p.
45. Aggelogiannaki E., Doganis Ph., Sarimveis H. An Adaptive Model Predictive Control configuration for Production–Inventory Systems // International Journal of Production Economics. 2008. V.114. pp. 165 – 178.
46. Филаретов В.Ф., Коноплин А. Ю. Система автоматической стабилизации подводного аппарата в режиме зависания при работающем многозвенном манипуляторе. Часть 1 // Мехатроника, автоматизация, управление. 2014. № 6. С. 53–56.
47. Филаретов В.Ф., Коноплин А. Ю. Система автоматической стабилизации подводного аппарата в режиме зависания при работающем многозвенном манипуляторе. Часть 2 // Мехатроника, автоматизация, управление. 2014. №7. С. 29–34.
48. Реализация эталонных стратегий процесса принятия решений в автоматизированных обучающих системах / А.А. Стенин, Е.Ю. Мелкумян, П.С. Хоменко // Міжвідомчий науково–технічний збірник «Адаптивні системи автоматичного управління». – Київ: НТУУ «Київський політехнічний інститут», – 2011. Вип. 19(39). сс.145–149.